

**ANÁLISIS MULTIESPECTRAL DE IMÁGENES SATELITALES PARA EVALUAR VARIACIONES
ESPACIO - TEMPORALES EN LA CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE EL GUÁJARO,
ATLÁNTICO.**

**ANDERSON G. BERDUGO MUÑOZ
GABRIEL J. REALES LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
BARRANQUILLA**

2016



ANÁLISIS MULTIESPECTRAL DE IMÁGENES SATELITALES PARA EVALUAR VARIACIONES ESPACIO -
TEMPORALES EN LA CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE EL GUÁJARO, ATLÁNTICO

**ANÁLISIS MULTIESPECTRAL DE IMÁGENES SATELITALES PARA EVALUAR VARIACIONES
ESPACIO - TEMPORALES EN LA CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE EL GUÁJARO,
ATLÁNTICO.**

ANDERSON G. BERDUGO MUÑOZ

GABRIEL J. REALES LÓPEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

ASESOR

Dr. FRANKLIN TORRES BEJARANO



**UNIVERSIDAD
DE LA COSTA**
1970

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
BARRANQUILLA,
2016**



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por aarnos dado la luz para poder alcanzar esta meta en nuestras vidas.

A nuestro director de tesis, el Dr. Franklin Torres Bejarano, por su incondicional apoyo, motivación, confianza, paciencia, asesoría y comprensión durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por habernos concedido parte de su tiempo y conocimientos, ya que a pesar de los muchos obstáculos presentados en el alcance de este proyecto, nunca nos dio la espalda y en medio de los errores su apoyo estuvo hay siempre hasta el último momento. Para nosotros es muy gratificante haber tenido la oportunidad de tenerlo como tutor a lo largo del desarrollo de este proyecto, siendo usted un gran ser humano creyente en nosotros.

A la Universidad de la Costa y el grupo de investigación Biotecnológico Ambiental, por suministrarnos los instrumentos que facilitaron el desarrollo de este proyecto.

A los evaluadores, el Ing. Rubén Cantero y la Ing. Luisa Fernanda Pinzón, por su contribución en el desarrollo de este trabajo de grado.

A nuestros padres por todos sus sacrificios, paciencia, perseverancia, dedicación, y amor durante todas las experiencias vividas en el transcurso de nuestro pregrado.

Nuestros compañeros porque siempre creyeron en nosotros y fueron punto de partida de nuestra investigación.

A mis familiares y amigos por su incondicional apoyo en los momentos más difíciles a lo largo de nuestra carrera.

Anderson Berdugo Muñoz.

Gabriel Reales López.



CONTENIDO

RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Formulación del problema.....	3
1.1.1. Situación Actual	5
1.1.2. Antecedentes.....	7
1.2. Justificación	10
1.2.1. Importancia del análisis multiespectral de imágenes satelitales para evaluaciones ambientales	13
1.2.2. Marco Normativo	13
1.3. Objetivos del proyecto.....	15
1.3.1. Objetivo general	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
2. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEORICO	16
2.1. Análisis multiespectral de imágenes satelitales	16
2.1.1. Diversos Programas para el análisis de imágenes satelitales y disponibilidades	16
2.2. Percepción Remota como herramienta en los diferentes campos	19
2.3. Diversas funciones de los satélites	20
2.4. Satélite LANDSAT.....	21
2.5. Estado del Arte	22
3. LANDSAT 8.....	24
3.1. Los avances evolutivos	24
3.2. Bandas del LANDSAT 8	27
3.2.1. Las bandas	28
4. ENVI 5.2.....	35
4.1. Formulación y Descripción.....	35
4.2. Funcionalidades	36
4.2.1. Análisis de Imágenes para los modelos de SIG en su aplicación	36
4.2.2. Análisis de Imágenes	36
4.2.3. Análisis espectral	37
4.3. Aplicaciones	37
5. METODOLOGÍA	40
5.1. Descripción de la zona de estudio.....	41
5.1.1. Actividades principales.....	42
5.2. Campañas de medición y colecta de datos	44



5.3.	<i>Resultados de la Calidad del Agua</i>	45
5.3.1.	Conductividad.....	45
5.3.2.	Oxígeno Disuelto	46
5.3.3.	pH.....	47
5.3.4.	Turbiedad.....	47
5.3.5.	Profundidad	48
5.4.	<i>Adquisición y procesamiento de las imágenes satelitales</i>	48
5.5.	<i>Delimitación de la superficie del agua</i>	49
5.6.	<i>Análisis estadístico</i>	50
5.7.	<i>Generación de mapas</i>	50
6.	RESULTADOS.....	51
6.1.	<i>Caracterización in situ</i>	51
6.1.1.	Modelos estadísticos de calidad de agua y profundidad	52
6.1.2.	Mapas de parámetros de calidad de agua y profundidad	56
7.	CONCLUSIONES	59
	REFERENCIAS	60



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Focos de contaminación registrados en el Embalse del Guájaro. (Fuente: MIN.AMB, CRA & CARDIQUE (2002))	12
Figura 2.	Localización del embalse El Guájaro. (Fuente: Los autores).	42
Figura 4.	Vista de la zona del Embalse del Guájaro de Landsat 8, 16 de marzo de 2015. (Fuente. Suministrada por la USGS).	27
Figura 5.	Sección del Embalse del Guájaro, Banda 1 Para esta Escena. (Fuente. Suministrada por la USGS).	29
Figura 6.	Sección del Embalse del Guájaro, Banda 2, 3 y 4 Para esta Escena. (Fuente. Suministrada por la USGS).	30
Figura 7.	Sección del Embalse del Guájaro, Banda 5 Para esta Escena. (Fuente. Suministrada por la USGS).	31
Figura 8.	Sección del Embalse del Guájaro, Banda 6 y 7 Para esta Escena. (Fuente. Suministrada por la USGS).	32
Figura 9.	Sección del Embalse del Guájaro, Banda 8 Para esta Escena. (Fuente. Suministrada por la USGS).	33
Figura 10.	Se observa en la imagen suministrada por el Satélite Landsat 8, la Banda 9 recoge los cúmulos de nubes. (Fuente. Suministrada por la USGS).	34
Figura 11.	Actividades de Metodología (Fuente: Autores).....	40
Figura 12.	Sitios de Medición y Muestreo (Fuente: Google earth).....	44
Figura 13.	Mediciones <i>in situ</i> de Conductividad Eléctrica (Izq. 28/02/2015; Der. 16/03/2015)	46
Figura 14.	Mediciones <i>in situ</i> de Oxígeno Disuelto (Izq. 28/02/2015; Der. 16/03/2015)	46
Figura 15.	Mediciones <i>in situ</i> de pH (Izq. 28/02/2015; Der. 16/03/2015).....	47
Figura 16.	Mediciones <i>in situ</i> de Turbiedad (Izq. 28/02/2015; Der. 16/03/2015)	48
Figura 17.	Mediciones <i>in situ</i> de Profundidad (Izq. 28/02/2015; Der. 16/03/2015)	48
Figura 18.	Mediciones <i>in situ</i> versus parámetros de calidad del agua y profundidad estimadas con modelos generados a partir de imágenes Landsat 8 del 16 de marzo de 2015.	54
Figura 19.	Resultados de la validación de los modelos, a través de análisis de regresión lineal simple, utilizando información espectral de la imagen del 28 de febrero de 2015 y resultados del muestreo I... ..	55



Figura 20. Variación espacial de CE, turbiedad, pH, OD y profundidad, estimados a través de los modelos estadísticos generados con la imagen Landsat 8 del 16 de marzo de 2015. 58



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Humedales en el Departamento del Atlántico	5
Tabla 2.	Software Gratis o freeware.....	17
Tabla 3.	Software Comerciales	18
Tabla 5.	Lista de Bandas del Landsat 8 (Resolución Espectral y Espacial).....	28
Tabla 6.	Coordenadas de los puntos de muestreos.....	45
Tabla 7.	Resultados de los parámetros medidos en campo.	51
Tabla 8.	Modelos estadísticos generados a partir de las imágenes Landsat, para estimar CE, turbiedad, pH, OD y profundidad en el embalse El Guájaro.	52



RESUMEN

El uso de imágenes de satélite ha fomentado el desarrollo de algoritmos y metodologías para la estimación de los parámetros de calidad del agua en los cuerpos de agua superficiales, por lo que en los últimos años, el monitoreo de la calidad del agua a través de técnicas de percepción remota es más accesible y eficiente. Landsat 8 es un satélite cuyo objetivo es monitorear la superficie de la tierra, a través del registro de imágenes multiespectrales, para generar información que conduzca a proteger el medio ambiente y la sostenibilidad de nuestro planeta; tiene dos sensores, el sensor multiespectral Operacional Land Imager (OLI) y el sensor infrarrojo térmico (TIRS).

El objetivo de este estudio fue generar modelos estadísticos para estimar los parámetros de calidad del agua en el Guájaro Embalse, en el norte de Colombia (turbidez, oxígeno disuelto, conductividad, pH y profundidad) con Landsat 8 imágenes espectrales, para servir como referencia para estimar la calidad del agua de este importante humedal.

Los datos obtenidos en el muestreo propuesto en campo se obtuvieron mediante dos campañas de muestreo durante el cual se midieron los parámetros de calidad del agua en diferentes puntos distribuidos en la superficie del embalse el Guájaro Reservoir. Las dos Campañas anteriormente mencionadas se manejaron paralelamente con el satélite Landsat 8 el cual nos proporcionó las imágenes satelitales de los diferentes sitios de muestreo para determinar de esta forma el ruteo establecido para la obtención de los parámetros. Los datos capturados fueron usados el mismo día de las mediciones de campo, y se descargaron mediante USGS Global Visualization Viewer (<http://glovis.usgs.gov/>). Para las imágenes del satélite se presentó el procesamiento mediante el software ENVI 5.2 el cual se utilizó, logrando excelentes resultados para la conductividad, turbidez y modelos de oxígeno disuelto. Por lo que podemos concluir que esta tecnología puede ser utilizada y recomendada para estimar las variaciones espaciales en la calidad del agua a través del depósito de Guájaro, y para validar otros parámetros, como el transporte de sedimentos en los cuerpos de agua superficiales.

Palabras Claves: Evaluación de la Calidad del agua, percepción remota, análisis multiespectral de imágenes.



ABSTRACT

The use of satellite imagery has encouraged the development of algorithms and methodologies for estimating the parameters of water quality in surface water, so in recent years, the monitoring of water quality through technical Remote sensing is more accessible and efficient. Landsat 8 is a satellite whose purpose is to monitor the surface of the earth, through the registration of multispectral images, to generate information leading to protect the environment and the sustainability of our planet; Two sensors, the multispectral sensor Operational Land Imager (OLI) and thermal infrared sensor (TIRS).

The aim of this study was to generate statistical models to estimate the parameters of water quality in the reservoir Guájaro, in northern Colombia (nitrate, fosfatos, chlorophyll, turbidity, dissolved oxygen, conductivity, pH and depth) with Landsat 8 spectral images , to serve as a reference to estimate the quality of water in this reservoir.

Field data were collected in three sampling campaigns during which water quality parameters were measured at different points distributed over the surface of the Guájaro Reservoir. Three Landsat 8 images (Route 53 Row 9) caught were used on the day of the field measurements, and download USGS Global Visualization Viewer (<http://glovis.usgs.gov/>). For satellite image processing software ENVI 5.2 was used, achieving excellent results for conductivity, turbidity and dissolved oxygen models. So we can conclude that this technology can be used and recommended to estimate the spatial variations in water quality through Guájaro tank, and to validate other parameters such as sediment transport in surface water bodies.

Keywords: Water quality assessment, remote sensing, multispectral analysis of images.



1. INTRODUCCIÓN

La calidad del agua tradicionalmente se monitorea a través de mediciones puntuales *in situ* y análisis de muestras en laboratorio (Chen and Yu., 2009); práctica que es costosa y requiere de mucho tiempo para su implementación, y que en la mayoría de los casos no es adecuada para observar variaciones espaciales y temporales en áreas extensas (He, Chen, Liu, & Chen, 2008). A través del monitoreo tradicional es difícil evaluar y predecir la calidad del agua en periodos de tiempo cortos, lo cual es esencial para la planeación, evaluación y manejo de la salud de los cuerpos de agua (Wang & Ma, 2001).

Considerando que las propiedades ópticas del agua pueden ser alteradas por variaciones en la concentración de parámetros relacionados con la calidad del agua (Pavelsky & Smith, 2009). Así como la no restricción para la obtención y uso de imágenes de satélite del programa Landsat, se ha favorecido el desarrollo de algoritmos para estimar parámetros de calidad del agua, tanto en cuerpos de agua continentales como no continentales (Hadjimitsis *et al.*, 2010), haciendo que el monitoreo de la calidad del agua a través de técnicas de percepción remota (PR) sea más accesible y eficiente (El Saadi, Yousry, & Jahin, 2014; He *et al.*, 2008). El principal beneficio de la teledetección por satélite para la evaluación de la calidad de las aguas continentales, es la producción de vistas sinópticas sin la necesidad de costosos muestreos *in situ* (Hadjimitsis *et al.*, 2010).

Sin embargo, la estimación de la profundidad y de la calidad del agua a través de imágenes de satélite tiene inconvenientes técnicos que han hecho que su uso no haya sido tan usual. Entre los principales inconvenientes está la dificultad de eliminar eficientemente el efecto de la atmósfera, el cual tiene un impacto significativo en los datos que registran los satélites, tal como la pérdida de información debido a la dispersión causada por los constituyentes atmosféricos y aerosoles, y a la baja relación señal/ruido de los sensores; no obstante, se han desarrollado metodologías para corregir las imágenes generadas por diferentes sensores (IOCCG, 2010; Roy *et al.*, 2014; Doña *et al.*, 2015).

Landsat 8 es un satélite cuyo objetivo es monitorear la superficie de la tierra, a través del registro de imágenes multiespectrales, para generar información que conlleve a cuidar el medio ambiente y la sostenibilidad de nuestro planeta; cuenta con dos sensores, el sensor multiespectral Operational Land Imager (OLI) y el sensor térmico infrarrojo Thermal Infrared Sensor (TIRS). A diferencia de los anteriores satélites Landsat (TM y ETM+), Landsat 8 tiene una resolución radiométrica más alta (12



bits), lo que hace que tenga una mejora significativa para detectar cambios en la superficie terrestre (Roy *et al.*, 2014).

Las técnicas de PR han tenido un auge reciente en el campo ambiental y se han realizado excelentes aplicaciones para estudios de evaluación de la calidad del agua. Por ejemplo, en el desarrollo de algoritmos integrados para la generación de datos desde imágenes satelitales de sensores remotos para generar estimaciones de parámetros de calidad de agua de interés, tales como las concentraciones de clorofila, la transparencia del agua o turbiedad y sedimentos suspendidos (Ritchie *et al.*, 2003; Hellweger *et al.*, 2004; Doña *et al.*, 2015; Harvey *et al.*, 2015). Así como para la estimación de parámetros de calidad del agua para determinar zonas acuícolas mediante sistema de imágenes multiespectrales e hiperespectrales (Rajitha *et al.*, 2007; Alexandridis *et al.*, 2008; Abd-Elrahman *et al.*, 2011).

El objetivo del presente estudio es generar modelos estadísticos que relacionen parámetros relacionados con la calidad del agua en el embalse el Guajaro (turbiedad, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), pH y profundidad) con registros espectrales capturados en imágenes Landsat 8, que sirvan como referencia para estimar la calidad del agua en el embalse y la variación de la profundidad. El embalse del Guájaros presenta algunos problemas, los cuales han contribuido al deterioro del cuerpo de agua y a cambios en su dinámica hidrobiológica, uno de estos problemas es la pérdida de la capacidad de almacenamiento, tal como lo mostraron registros satelitales tomados en los años 2000 y 2001 donde se observa una pérdida de 4,065 ha aproximadamente del área total y 89,448,293,52 m³/año en su capacidad de almacenamiento (CRA, 2014). Esta pérdida de capacidad se debe principalmente a la disminución de la profundidad del embalse por la deposición de sedimentos provenientes de su micro cuenca.

El Guájaros es un embalse cuyas aguas presentan diferentes tipos de uso, de él se extrae agua para consumo humano, para riego agrícola, se cultivan peces, por lo que es una importante fuente de ingresos para los habitantes de la región. Es por ello la importancia de conocer la variación espacial y temporal de la calidad del agua y la profundidad en El Guájaros, por esto la necesidad de contar con una herramienta que sirva de base para el manejo ambiental, económico y social de este cuerpo de agua.



1.1. Formulación del problema

Factores como régimen climático, complejidad orogénica y ubicación biogeográfica se han combinado de forma excepcional para permitir que el recurso hídrico en Colombia sea abundante y modele el paisaje tropical formando ríos, estuarios, pantanos, ciénagas y lagunas, entre otros (Castellanos, 2015; Minambiente, 2010). En Colombia, la principal institución encargada de monitorear el estado del recurso hídrico a nivel nacional es el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), que desde su creación hace 20 años, se encarga de monitorear tanto la disponibilidad del recurso, como la calidad del agua. Paralelamente, a nivel regional las autoridades ambientales se encargan de realizar monitoreo de los cuerpos de agua pertenecientes a cada región. La gestión que se realiza sobre el recurso hídrico está dividida en cuatro grandes grupos: planificación, administración, seguimiento y monitoreo, y manejo de conflictos relacionados con el agua (ENA, 2014). A pesar de que el IDEAM ha dado las pautas para realizar las actividades de seguimiento y monitoreo, la mayoría de las autoridades ambientales no realiza estos procesos. Es importante destacar que tan solo 8 de las 39 autoridades ambientales cuentan con un grupo o una unidad de recurso hídrico en sus estructuras organizacionales, es decir, que en la mayoría de los casos las diferentes funciones de la gestión del recurso hídrico (planeación, administración, seguimiento y monitoreo, y legislación) están dispersas, lo que facilita que no haya unidad de criterio (Minambiente, 2010). La calidad de las aguas superficiales se ha deteriorado en muchos países en las últimas décadas. Como resultado de la creciente población, el aumento de la industria, la agricultura y la urbanización, los cuerpos de aguas continentales se enfrentan a la demanda creciente de agua, y se enfrentan a amplios aportes antropogénicos de nutrientes y sedimentos, especialmente los lagos y embalses (Kondratyev y Pozdnyakov, 1998). Para hacer frente a este problema, es necesario llevar a cabo la evaluación de la calidad del agua, la planificación y la gestión, en la que el monitoreo de calidad del agua juega un papel importante (Seker *et al.*, 2003). Los embalses, son una parte esencial de los recursos hídricos globales, sin embargo en algunas ocasiones son estudiados en un contexto individual y específico. Los recursos hídricos de Colombia han sido de vital importancia y sobre ellos se han desarrollado investigaciones que buscan su buena gestión y conservación. En el departamento del Atlántico muchas de estas investigaciones se han realizado sobre el embalse El Guájaro, el cual es considerado una eco-región estratégica, con una extensión de 16,000 ha, un volumen de 400 Mm³ y un volumen útil de 230 Mm³, drena 12,000 ha por medio de un distrito de riego y drenaje, y posee dos sistemas de compuertas que lo comunican con el canal del dique, permitiendo controlar los niveles del embalse (MMA-BID-CRA-CARDIQUE, 2000). Pero, a pesar de lo



anterior, múltiples son los problemas asociados a este embalse y que son generados en gran medida por las actividades antropogénicas. Dentro de los problemas que se presentan en el embalse El Guájaro, se destacan los siguientes:

- Los vertimientos de aguas residuales que afectan la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos. El exceso de cargas de nutrientes (fósforo y nitrógeno) provocan la eutrofización (Escobar, 2002), debido a las escorrentías provenientes de zonas agropecuarias.

De igual forma, el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas causan una degradación de la calidad del agua, principalmente por el agotamiento del oxígeno disuelto impidiendo el desarrollo normal de los recursos hidrobiológicos asociados al ecosistema (Barba, 2002). Estudios han encontrado evidencias que vinculan las concentraciones aumentadas de nitratos y fosfatos con eflorescencias de algas en lagos poco profundos y aguas costeras (PNUMA, 2007).

- Aumento de la erosión y la sedimentación. La deforestación de las zonas aledañas al embalse y otras alteraciones del suelo generan con frecuencia grandes cantidades de sedimentos que degradan la calidad del agua y destruyen los hábitats lacustres (Libreros *et al.*, 2013). La sedimentación puede provocar azolvamiento e interfiere con los mecanismos de control de flujo y reduce su capacidad de control de inundaciones (CEPAL, 2002).

Los anteriores, son problemas que se presentan en el embalse El Guájaro y por tanto deben dirigirse esfuerzos que propongan y busquen sus soluciones. De acuerdo al contexto y la región en la que se encuentra este cuerpo de agua, conocer y mantener una calidad del agua óptima, aparecen como los temas de mayor relevancia, teniendo en cuenta los usos y servicios que el embalse ofrece a la población de la zona.

Por otro lado, los métodos tradicionales de monitoreo de calidad del agua usualmente son costosos y requieren de mucho tiempo en su implementación, ya que se necesita viajar a los sitios de estudio, coleccionar muestras y realizar gran cantidad de análisis en el laboratorio, especialmente en cuerpos de agua de gran tamaño. Algunos autores (Jiufa y Chen, 1998; Creed *et al.*, 2001) han señalado que estos instrumentos modifican las condiciones físicas del muestreo (i.e. velocidad de captura, volumen de muestra) conduciendo a imprecisiones en el valor de sólidos. Estos instrumentos realizan mediciones puntuales, y por lo tanto no permiten cuantificar la variabilidad temporal y espacial (Holdaway *et al.*, 1999). Así mismo, a través de tales monitoreos es difícil reportar y predecir la calidad del agua en



periodos de tiempo cortos, lo cual es esencial para la evaluación, planeación y manejo de la salud de los cuerpos de agua (Wang y Ma, 2001).

En ese sentido, y debido a que los contaminantes se dispersan y absorben la radiación solar entrante, la calidad del agua puede correlacionarse significativamente con características ópticas de la columna de agua. Afortunadamente, con el desarrollo e implementación de técnicas de percepción remota (PR) para realizar monitoreos de calidad del agua se aporta una serie de ventajas al monitoreo ambiental, dentro de las que se pueden mencionar rapidez de adquisición de información de grandes superficies acuáticas, terrestres o atmosféricas; monitoreo permanente de la zona de estudio, lo cual permite generar una base de datos actualizada; facilidad de estudio en áreas inaccesibles o de difícil acceso y bajo costo, sobre todo cuando el área de estudio se incrementa (He *et al.*, 2008). Por lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible implementar una herramienta tecnológica de percepción remota que suministre información confiable, que permita realizar una adecuada evaluación de la calidad del agua en ecosistemas acuáticos superficiales?

1.1.1. Situación Actual

El Departamento del Atlántico cuenta con un volumen cercano a los 454.577.500 m³ de agua representada en ciénagas y pantanos. La cobertura total de los cuerpos de agua corresponde a 21.697 Ha que se pueden agrupar en tres grandes subzonas hidrográficas: Vertiente Occidental del Río Magdalena, Canal del Dique y Arroyos directos al Mar Caribe, representando esto, el hábitat natural de especies de fauna silvestre importantes para la región (IDEAM, 2005).

En la Tabla 1 se mencionan los humedales del departamento del atlántico.

Tabla 1. Humedales en el Departamento del Atlántico

NOMBRE DEL HUMEDAL	SUBZONA HIDROGRAFICA	AREA (Ha)	NOMBRE DEL HUMEDAL	SUBZONA HIDROGRAFICA	AREA (Ha)
Ciénega de Mallorquín	Ciénega de Mallorquín	857	Lago del Cisne o Ciénega Rincón1	Ciénega de Mallorquín	46,33
Ciénega Los Manatíes	Ciénega de Mallorquín	41,216	Ciénega de Balboa	Arroyos directos al Mar Caribe	120,85
Embalse del Guájaro	Canal del Dique	14	Ciénega de Luruaco	Arroyos directos al Mar Caribe	420



NOMBRE DEL HUMEDAL	SUBZONA HIDROGRAFICA	AREA (Ha)	NOMBRE DEL HUMEDAL	SUBZONA HIDROGRAFICA	AREA (Ha)
Ciénega de Tocagua	Arroyos directos al Mar Caribe	300	Ciénega la Bahía	Complejo de humedales de la vertiente occidental del Rio Magdalena	337
Ciénega de Malambo o Grande	Complejo de humedales de la vertiente occidental del Rio Magdalena	215	Ciénega de Sabanagrande	Complejo de humedales de la vertiente occidental del Rio Magdalena	95
Ciénega Convento	Complejo de humedales de la vertiente occidental del Rio Magdalena	250	Ciénega de Santo tomas	Complejo de humedales de la vertiente occidental del Rio Magdalena	105
Ciénega Luisa y larga	Complejo de humedales de la vertiente occidental del Rio Magdalena	865	Ciénega Uvero	Complejo de humedales de la vertiente occidental del Rio Magdalena	424
Ciénega Sanaguare	Complejo de humedales de la vertiente occidental del Rio Magdalena	125	Ciénega Vieja	Complejo de humedales de la vertiente occidental del Rio Magdalena	35
Ciénega La Poza	Complejo de humedales de la vertiente occidental del Rio Magdalena	23			

Fuente CRA

Embalse del Guájaro: De las 22.000 hectáreas aproximadas de humedales lenticos, se estiman 16.000 Ha en el Embalse el Guájaro, por lo que es fácil evidenciar la distribución poco equitativa de estas reservas hídricas, además hoy en día se estima que el Guájaro redujo su espejo de agua hasta las 12.000 Ha., aproximadamente, lo que permite determinar una pérdida de más de 4000 Ha. de espejo en las últimas décadas. El Embalse del Guájaro se encuentra definido como ecorregión estratégica y a su vez, es considerado como el segundo embalse más importante por su extensión y productividad, dentro de los de su tipo en el país según la FAO.



Según Oyaga (2010), en a las problemáticas reportadas a través de los años, se presentan: la pérdida de cobertura vegetal debido a la intensa deforestación en la parte alta de la cuenca, dejando al descubierto la capa vegetal que es arrastrada por la lluvia y el viento, aumentando el aporte de sedimentos a la ciénaga y disminuyendo por lo tanto su capacidad de almacenamiento. En cuanto a recursos hidrobiológicos los mayores conflictos están relacionados con la contaminación, introducción de especies foráneas, utilización de prácticas ilícitas de pesca y la ausencia de conciencia ambiental por parte de las comunidades, ponen de manifiesto un notable detrimento en cuanto a la oferta de recursos pesqueros hidrobiológicos de los cuerpos de agua. Otro tipo de conflicto que se presenta entre pescadores ganaderos y agricultores es en el manejo de las compuertas específicamente en el municipio de Repelón, debido a que en el manejo de estas compuertas no existe ningún tipo de acuerdo, lo que ha conllevado a que las compuertas sean manipuladas sin ningún control, dependiendo de los intereses de cada uno de los actores que intervienen: así por ejemplo a los ganaderos les conviene que las compuertas estén cerradas para ganar espacios en el establecimiento de áreas en pastizales y poco a poco ganar tierras para ampliar sus predios, al pescador le interesa mantener las compuertas abiertas para que haya interflujo, manteniéndose los niveles óptimos para el sostén de los nichos ecológicos de las especies acuáticas para mejorar la actividad pesquera, por último a los agricultores les interesa una regulación entre el cierre y la apertura de las compuertas para regular las aguas.

1.1.2. Antecedentes

El embalse El Guájaro fue construido entre 1964 y 1965 por el INCORA, para convertir las antiguas ciénagas de La Limpia y El Guájaro en un solo cuerpo de agua; desde entonces se conoce con este nombre. El embalse tiene un área de 16.000 hectáreas y está conformado por una presa en tierra de 12.5 Km de longitud, un volumen de 400 Mm³ y un volumen útil de 230 Mm³, drena 12,000 ha por medio de un distrito de riego y drenaje, cuenta con dos sistemas de compuertas que la comunican con el canal del dique, permitiendo controlar los niveles del embalse (POMCA, 2010).

Posterior a la obras realizadas por el INCORA, la Gobernación del Atlántico se mantuvo al frente de las obras complementarias y de mantenimiento. En los últimos 10 años la Gobernación del Atlántico junto con la Universidad del Norte y otras entidades como CORMAGDALENA y la Universidad del Magdalena, han realizados estudios que concernientes a canal navegable del canal del dique y algunos sobre estado hidráulico del embalse El Guájaro. Estos últimos corresponden a los trabajos para la



vulnerabilidad del Hidrosistema antes eventos climatológicos extremos. Además se establecen los protocolos de operación de las compuertas, Villa Rosa y El Porvenir.

En el año 2007 se publica el trabajo denominado Plan de Manejo Ambiental del Complejo de Ciénagas el Totumo, Guájaro y el Jobo en la Ecorregión estratégica del Canal del Dique, enmarcado dentro del proyecto Manejo Integral del complejo de Ciénagas el Totumo, Guájaro y el Jobo financiado por el Ministerio del Medio Ambiente, mediante el Programa ambiental crédito BID 774/OC-CO, Subprograma de Inversiones Ambientales y cofinanciado por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico C.R.A y la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE). El Plan de Manejo Ambiental se constituye en una herramienta de planeación para los entes territoriales del área de jurisdicción, las organizaciones comunitarias establecidas en la zona de influencia de los humedales, y los grupos productivos. Se formuló siguiendo la metodología de RAMSAR para planes de manejo y en la Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia: Estrategia para su conservación y uso sostenible. La formulación de este plan reconoce la gran importancia de los humedales, así como el hecho que se encuentran muy amenazados por diferentes actividades humanas no sostenibles, sin tener en cuenta que son fuente de muchas riquezas, y que proveen múltiples bienes y servicios para el desarrollo de las actividades económicas a nivel regional y local.

La Universidad del Norte en convenio con la Gobernación del Atlántico en el año 2008, realizaron el estudio titulado “Embalse el Guájaro diagnóstico hidráulico y ambiental de las condiciones actuales” este estudio tenía varios objetivos propuestos:

- ✓ Evaluar los cambios de orilla del embalse en el tiempo.
- ✓ Definir el volumen de agua disponible.
- ✓ Definir la posible circulación del embalse.
- ✓ Definir la calidad del agua en los sitios donde se encuentran las jaulas de peces.
- ✓ Definir la calidad del agua frente a la bocatoma del acueducto de Repelón.
- ✓ Revisión sobre los caudales teóricos de entrada del Canal del Dique.
- ✓ Revisión sobre los aportes por aguas lluvias.
- ✓ Revisión sobre los aportes de sedimentos por el Canal del Dique y arroyos, y alternativas para controlarla.



La gobernación del Atlántico y la embajada de Francia en Colombia, acordaron en junio del año 2010, la realización de un estudio financiado por el Fondo Francés FASEP, para la gestión de las aguas y de los suelos del Embalse El Guájaro, en el cual se integraron los ejes: tratamiento de aguas residuales, conservación de los suelos para el manejo agrícola y organización de la cuenca para un desarrollo sostenible.

En el año 2012 se publica el trabajo “Actualización del manual de operaciones del hidrosistema al cual pertenece el embalse el Guájaro y llevar a cabo el diseño de las estructuras y sistemas para disminuir la vulnerabilidad de la zona ante eventos climatológicos extremos, convenio 003 de 2012 Problemáticas del embalse”. El objetivo general de este estudio consistió en establecer las estructuras y sistemas necesarios para garantizar la sostenibilidad del Embalse El Guájaro y la disminución de la vulnerabilidad de la zona ante eventos climatológicos de precipitación extrema, para ello fue necesario realizar los estudios hidrológicos e hidráulicos correspondientes.

En lo que tiene que ver con el transporte de sustancias biodegradables en el medio, se reporta un estudio en el que se utilizó un modelo matemático para describir estos procesos, el documento corresponde al Estudio del Impacto de la Actividad Camaronicultora en Agua Dulce, Sobre la Capacidad de Carga del Embalse El Guájaro (CRA, 2007). Este documento con base a la información secundaria correspondiente al año de realización y en la cual se desarrolló la investigación de la capacidad de carga del embalse El Guájaro, como respuesta a los eventuales vertimientos de sustancias orgánicas y nutrientes, provenientes de la actividad de camaronicultura en agua dulce. El modelo que se utilizó en este trabajo fue el LACAT, desarrollado por CEPIS (2001), se basa en el principalmente en el Fosforo (P) como nutriente limitante, para la evaluación de estados tróficos y el manejo de macronutrientes en lagos/embalses tropicales. Este modelo predice la respuesta trófica de lagos/ embalses tropicales a cambios en la concentración de fósforo total, basado en dos tipos de relaciones: balance de masas y La ecuación de regresión múltiple para fósforo total producto de una regresión "stepwise", con todas las variables independientes disponibles.

La Corporación Autónoma Regional del Atlántico CRA, como autoridad ambiental que vela por la protección de la fauna íctica en el Departamento del atlántico y de las actividades que se desarrollan a través de los convenios existentes por las Asociaciones Agropecuarias y pesqueras de los diferentes cuerpos de aguas con que estas interactúan, en el año 2007 opta por evidenciar por medio de estudios de imágenes satelitales el comportamiento de la sedimentación y profundidad del cuerpo de agua



Embalse del Guajaro con el fin evaluar los distintos factores que presentaban cambios en sostenibilidad de este cuerpo de agua. CRA, ASOCAGUA (2007). Estudio de Evaluación del Impacto de la Actividad Camaronera Sobre la Capacidad de Carga del Embalse del Guájaro. Tomo III, pp 11-40.

1.2. Justificación

La Corporación Autónoma Regional del Atlántico CRA, la Dirección Territorial Caribe de Parques Nacionales, la Gobernación del Atlántico, los municipios del Atlántico y el DAMAB, reafirmaron los compromisos en la consolidación del Sistema Departamental de Áreas protegidas del Atlántico a través del convenio marco de cooperación para constituir la mesa de trabajo del SIDAP Atlántico. El Sistema Local de Áreas Protegidas (SILAP) es el conjunto de espacios con valores singulares para el patrimonio ecológico del municipio, la región o la nación, cuya conservación resulta imprescindible para el funcionamiento de los ecosistemas naturales, la conservación de la biodiversidad y la evolución de la cultura en el municipio, las cuales en beneficio de todos los habitantes, se reservan y se declaran dentro de cualquiera de las categorías de área protegida y denominaciones que se pueden aplicar a nivel municipal de acuerdo a la ley y normas reglamentarias, (SIRAP, Sistema Regional de Áreas Protegidas, 2005). La Corporación Autónoma Regional del Atlántico viene trabajando desde el año 2006 en el programa de áreas protegidas, adaptándose a la Política Nacional de Biodiversidad que en el año 1997 conformó el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP). Para ello, estableció en su Plan de Acción 2007-2012, en su Desafío 3, el programa de Áreas protegidas en el Departamento; planteando una línea de Conservación y aprovechamiento sostenible de la biodiversidad con el fin de incentivar la protección, conservación y uso de los recursos naturales y la biodiversidad procurando asegurar la sostenibilidad del equilibrio ambiental del Departamento del Atlántico.

Es evidente que los cuerpos de agua del departamento del Atlántico están fuertemente intervenidos por las actividades humanas, por lo cual el exagerado crecimiento de las poblaciones ubicadas en las orillas del embalse se convierte en el principal conflicto. Este, además genera diferentes problemáticas como:

- Pérdida de cobertura vegetal por deforestación intensa para despejar terreno donde construir viviendas o para su utilización como carbón vegetal, trayendo como consecuencia un aumento de los sedimentos en el agua por arrastre por parte de los vientos, las lluvias o los arroyos que llegan al embalse.



- Ocupación de rondas hídricas, principalmente en época seca para realizar cultivos.
- Retención del flujo y canalización de los arroyos con fines particulares disminuyendo el aporte de agua al embalse.
- Introducción de especies exóticas o foráneas que disminuyen la oferta de recursos pesqueros e hidrobiológicos del cuerpo de agua.
- Falta de acuerdos en el manejo de las compuertas. A pesar que la CRA ha intentado tomar el manejo de las compuertas, los intereses particulares han generado conflictos ya que a algunos, como los pescadores, les conviene tenerlas abiertas para que se mantengan los niveles óptimos para tener una buena pesca; a otros, los agricultores, les interesa una regulación entre el cierre y la apertura; mientras que a los ganaderos les conviene que las compuertas estén cerradas para ganar espacios en el establecimiento de áreas en pastizales.
- Utilización de artes de pesca inadecuados que deterioran la producción y desmejoran la actividad pesquera. Uno de los métodos utilizados es el sangarreo, principalmente en los corregimientos de Aguada de Pablo y la Peña (Sabanalarga –Atlántico).
- Actividades como agricultura y ganadería extensiva inciden negativamente con prácticas inadecuadas de mecanización del suelo, la adición de agroquímicos, la carencia de tecnificación, el sobrepastoreo y la predicción de la avifauna incrementan el deterioro del ecosistema.
- Desconocimiento general de las funciones, productos y atributos del embalse, y falta de educación ambiental por parte de los lugareños, ocasionando deterioro del ecosistema.
- Vertimiento de residuos sólidos en el cauce de los arroyos que llegan al embalse, causando contaminación del cuerpo de agua y disminución de recursos hidrobiológicos. Asimismo, el inadecuado manejo de las canteras de minería, que incluso a pequeña y mediana escala, principalmente en el corregimiento de Arroyo de Piedra, es una causa más de la conducción de sedimentos hacia el embalse.
- Vertimiento de residuos líquidos sin tratamiento ya que algunas de las poblaciones del área de estudio no cuentan con servicio de alcantarillado. En la siguiente Figura se puede apreciar la ubicación de los focos de contaminación en el embalse que aunque se encuentran identificados desde 2002, en su mayoría continúan siendo los mismos.

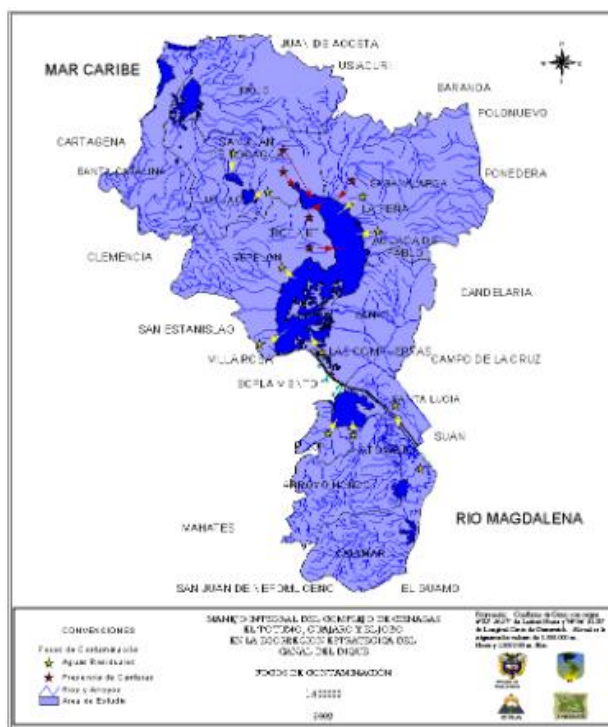


Figura 1. Focos de contaminación registrados en el Embalse del Guájaro. (Fuente: MIN.AMB, CRA & CARDIQUE (2002))

Este estudio de investigación se encuentra direccionado a la ejecución de análisis multiespectral de imágenes satelitales para la evaluación de la calidad del agua bajo diferentes condiciones climáticas. Por medio de las cuales se podrá determinar y evaluar las variaciones espacio - temporales en la calidad del agua, en este significativo cuerpo de agua. Además esta soportada dentro del plan de acción de 2012-2015 de la Corporación Autónoma Regional de Atlántico (CRA), en el eje estratégico, Recurso Hídrico y más específicamente en la dependencia de Ordenamiento y Regulación del Recurso Hídrico. Asimismo, la propuesta generará información y datos indispensables para lograr la construcción de instrumentos útiles que contribuyan en la gestión del recurso hídrico, como en la planificación y el manejo de conflictos, así como en el diagnóstico del estado del recurso, en calidad y posibles riesgos, como lo estipula la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, sobre la administración y monitoreo que permitiendo el aprovechamiento sostenible del embalse El Guájaro y de cuerpos de agua con características similares al de nuestra área de estudio.



1.2.1. Importancia del análisis multiespectral de imágenes satelitales para evaluaciones ambientales

Las principales actividades para el desarrollo de este proyecto toman como herramientas en primera medida, la adquisición de la información primaria y secundaria, correspondientes a las imágenes satelitales e información complementaria para el proyecto.

Una vez valorada la calidad de la información de las imágenes, se realizará la clasificación no supervisada. La clasificación de imágenes de satélite permite delimitar áreas y coberturas para hacer una interpretación, basándose en la manipulación numérica de las imágenes, se pueden interpretar y clasificar los números digitales que representa cada píxel y convertirlos a un lenguaje que pueda manipular y trabajar en diferentes realces, con este método lograr un mapeo diferente.

Los métodos tradicionales de clasificación involucran dos alternativas, el método no supervisado y el supervisado. El primero crea agrupamientos espectrales o clusters en el cual se asocia una clase temática a cada uno de los grupos que se clasifico, de esta forma se pueden determinar cambio en las imágenes. (Chuvieco Emilio, Teledetección Ambiental, La Observación de la Tierra Desde el Espacio., 2000 Ed. Ariel Ciencia. Madrid – España.)

1.2.2. Marco Normativo

Teniendo en cuenta el amplio sentido del deber ser del estado que posee nuestro país, Colombia es un país que en su amplio direccionamiento normativo cuenta con un soporte jurídico bastante fuerte en materia ambiental. Haciendo puntualidad en nuestra constitución política en sus artículos 79 y 80 que establece la protección de la diversidad e integridad del ambiente, para así conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación ambiental para así llegar a la garantía del derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución, debiendo prevenir y controlar los factores propicios al deterioro ambiental.

Partiendo de lo anterior Colombia en su alto nivel de riqueza en cuanto se refiere a recursos naturales corresponde al estado garantizar y velar por la calidad del agua para su consumo humano y demás usos que a esta se le proporcionen, requiriendo así la aplicación de instrumentos que prevengan y controlen su mal manejo y vertimientos contaminantes a esta. Teniendo en cuenta la utilización directa e indirecta del recurso hídrico, el Programa de proyectos del Plan Hídrico Nacional fase II (2015 – 2018)



en su capítulo 3.1 en materia oferta el programa de conocimiento y Gestión de la información del recurso Hídrico; lo cual nos lleva a la puntualización sobre la Gestión Ambiental y la calidad y riesgos presentes para el fortalecimiento del recurso vía al desarrollo sostenible.

En conexidad el Ministerio de Ambiente decreto número 2667 de diciembre de 2012, en su capítulo II Proyectos de inversión en descontaminación y monitoreo de la calidad del recurso hídrico. Da explicación que todas aquellas inversiones para el mejoramiento, monitoreo y evaluación de la calidad del recurso hídrico, incluyendo la elaboración y ejecución de los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico, inversiones en interceptores, emisarios finales y sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Hasta un 10% del recaudo de la tasa retributiva podrá utilizarse para la cofinanciación de estudios y diseños asociados a estas obras. En este mismo orden en su capítulo 4 Autoridades ambientales competentes. Son las Corporaciones Autónomas Regionales, las Corporaciones para el Desarrollo Sostenible, los Grandes Centros Urbanos a los que se refiere el artículo 66 de la Ley 99 de 1993, los establecimientos públicos ambientales creados en virtud del artículo 13 de la Ley 768 de 2002, y Parques Nacionales Naturales de Colombia, creada por el Decreto-Ley 3572 de 2011, siempre y cuando corresponda a los usos permitidos en las áreas que integran el Sistema de Parques Nacionales Naturales. Dentro del PNGIRH se propone que la disponibilidad nacional de agua es teórica en términos de acceso para su aprovechamiento y cierta en cuanto a los impactos causados por eventos extraordinarios expresados en sequías e inundaciones y otros fenómenos asociados como deslizamientos y lahares. Esta situación se debe por un lado, al régimen natural espacial y temporal del recurso; y por el otro, a la falta de actividades organizadas, coherentes y coordinadas de gestión del agua. Conforme la información recabada y analizada se estima que (I) los usos actuales han comprometido el caudal que naturalmente escurre por vertientes, nacimientos, ríos y lagos - aguas superficiales; (II) en general el agua aprovechada se refiere a la posible de derivar dentro de una misma propiedad o entre varias propiedades cuyos dueños están dispuestos a permitir servidumbres de acueducto voluntarias; y (III) el aprovechamiento de las aguas subterráneas se incrementa conforme las fuentes superficiales se hacen más escasas. La proporción en la extracción de agua de los usos consuntivos es similar a la del resto del mundo. La agricultura consume cerca del 40 %, el uso doméstico el 9 % y otros usos, entre ellos el industrial, el 3 %. El 48 % restante se emplea en usos no consuntivos, principalmente hidroelectricidad. Aún no se han estimado las demandas de agua para fines turísticos ni caudales ecológicos.



En el ítem de monitoreo, se concluye que en el país no existe un monitoreo periódico, sistemático y articulado de la calidad de las fuentes hídricas superficiales y subterráneas. También describe que se han logrado avances en temas relacionados con la implementación de modelos matemáticos en el país, como es el caso de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y, la Corporación Autónoma Regional de Sucre (CARSUCRE), que utilizan esta herramienta como un elemento de gestión en la concepción de aguas subterráneas.

1.3. Objetivos del proyecto

1.3.1. Objetivo general

Realizar un análisis multi-espectral de imágenes satelitales, para proporcionar datos confiables que permitan evaluar la calidad del agua del Embalse El Guájaro, Atlántico.

1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar el software ENVI 5.2 para realizar un análisis multiespectral de imágenes satelitales mediante la adquisición de imágenes LANDSAT 8.
- Calibrar y validar las imágenes multi-espectrales LANDSAT 8, utilizando la información de calidad del agua obtenida en campo.
- Determinar la distribución espacio-temporal de los parámetros de calidad del agua (Temperatura, Salinidad, Oxígeno Disuelto y Sólidos Suspendidos) en el embalse El Guájaro.



2. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEORICO

2.1. Análisis multiespectral de imágenes satelitales

Las características espectrales del agua hacen que ciertas propiedades de la misma sean fácilmente identificables mediante teledetección. El agua clara tiene unas excelentes propiedades en cuanto a transmisión de la radiación electromagnética en el espectro visible y de absorción en el infrarrojo. Cuando hay presencia de turbidez, la respuesta espectral obtenida por el sensor difiere de la del agua clara. Dependiendo del tipo de componente que provoque esta turbidez, la respuesta espectral del agua se verá modificada en una u otra región del espectro, siendo este susceptible de ser recogido en imágenes adquiridas a través de sensores remotos (Vázquez, 2000). La percepción remota, o teledetección, se define como la técnica que permite obtener una imagen de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales a través de la interacción energética entre el sensor y el objeto, ya sea mediante la reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, o mediante la emisión propia del objeto observado (Chuvieco, 2008). En sentido amplio, la percepción remota también incluye la toma de información procedente de sensores ubicados sobre la superficie terrestre, correspondientes a sistemas sonar, radar de penetración terrestre y sistemas de medición de contaminación atmosférica (NRC, 2003), aunque generalmente el concepto hace referencia a toma de información desde la atmósfera o desde el espacio exterior. Su importancia radica en la posibilidad de obtener información sobre grandes superficies, en regiones de difícil acceso por sus características políticas o geográficas, con la consecuente disminución de costos asociados a la toma directa de datos. Adicionalmente, los sensores remotos permiten adquirir datos de manera periódica, siendo posible detectar y monitorear cambios a resoluciones espaciales detalladas (NRC, 2001).

2.1.1. Diversos Programas para el análisis de imágenes satelitales y disponibilidades

En la Tabla 2 se presentan algunos software gratis o freeware, desarrollados por diferentes organizaciones para el análisis de imágenes digitales:



Tabla 2. Software Gratis o freeware

PROGRAMAS	DISPONIBILIDADES
MultiSpec	Está disponible para las plataformas de Windows y Macintosh, y se está desarrollando en la universidad de Purdue. Fue diseñado originalmente como una herramienta de enseñanza pero ahora es utilizada por muchos usuarios de la percepción remota. MultiSpec ofrece algunas herramientas sofisticadas de la clasificación de imágenes.
FWTools (OpenEV)	OpenEV es un programa que exhibe y analiza datos geoespaciales en formato vector y raster. Funciona en Windows, Linux y algunas otras plataformas del Unix, y una plataforma para Macintosh está en marcha. La actividad del desarrollo es absolutamente activa y muchas nuevas capacidades están en marcha. Éste es uno de los paquetes libres más ampliamente utilizados de la visualización de imágenes remotamente adquiridas.
NASA Image2000	Image2000 es un paquete para el proceso de imágenes basado en Java que fue desarrollado por la NASA. El desarrollo ha parado actualmente pero el programa está disponible para la transferencia directa. Image2000 proporciona una amplia gama de funciones pero se limita en que no maneja adecuadamente sets grandes de datos.



Tabla 3. Software Comerciales

PROGRAMAS	DISPONIBILIDAD
ENVI 5.2	ENVI es el software ideal para la visualización, análisis y presentación de todo tipo de imágenes digitales. Este completo paquete de tratamiento de imágenes incluye herramientas tan avanzadas como fáciles de usar para análisis espectral, corrección geométrica, análisis de terreno, análisis de radar, gestión de información SIG, soporte de múltiples formatos. ENVI 5.2 te da la oportunidad de incorporar vídeo, espacio y capacidades de tiempo en su análisis de imágenes geoespaciales. (http://www.geosistec.com/productos_envi.html ., ESRI).
Image Analysis de ArcGIS	Image Analysis de ArcGIS se utiliza para preparar imágenes que pueden ser usadas directamente en un SIG, para posteriormente analizar y extraer información de ellas. Esta extensión de ArcGIS le permite al usuario extraer la información actualizada de imágenes directamente en una estructura tipo geodatabase de ESRI. Los problemas que usualmente se generan cuando se aplican procesos de varios pasos puede ser evitados trabajando directamente con los datos en un geodatabase. También es posible realizar clasificaciones de la vegetación para determinar la composición y cobertura vegetal. Adicionalmente, la detección del cambio se puede realizar en las imágenes capturadas en diversos tiempos. Las técnicas del realce de la imagen están disponibles para, por ejemplo, ajustar brillo y contraste.
ERMapper	Es un paquete para el procesamiento de imágenes y para otros usos de las ciencias de la



tierra y de la percepción remota. Ha sido diseñado para manipular sets grandes de datos de recursos naturales (e.g. datos del satélite, geofísicos, sísmicos). ERMapper puede combinarse, acortar, muestrear, cambia la escala y hacer mosaicos de sets múltiples de datos automáticamente. Los datos raster se pueden cambiar a partir de una proyección del mapa a otra. La capacidad para visualización 3D permite que los usuarios vean datos vector y raster en 3D y obtener una mejor perspectiva de las escenas y del sobrevuelo.

2.2. Percepción Remota como herramienta en los diferentes campos

Considerando que las propiedades ópticas del agua pueden ser alteradas por variaciones en la concentración de parámetros relacionados con la calidad del agua (Pavelsky & Smith, 2009). Así como la no restricción para la obtención y uso de imágenes de satélite del programa Landsat, se ha favorecido el desarrollo de algoritmos para estimar parámetros de calidad del agua, tanto en cuerpos de agua continentales como no continentales (Hadjimitsis *et al.*, 2010), haciendo que el monitoreo de la calidad del agua a través de técnicas de percepción remota (PR) sea más accesible y eficiente (El Saadi, Yousry, & Jahin, 2014; He *et al.*, 2008).

La percepción remota es una técnica que permite elaborar levantamientos de altos volúmenes de información de la superficie terrestre que sirve de apoyo a diversas ciencias de cara a un conocimiento más avanzado del espacio que nos circunda. Dentro de este esquema, la percepción remota ocupa un lugar de notable aplicación en las actividades agrícolas, medioambientales, catastrales, militares, industriales, y de ordenamiento territorial; lo cual subraya el interés de esta técnica para un amplio abanico de disciplinas y pone de manifiesto la necesidad de promover este tipo de tecnología de una forma adecuada que constituya un apoyo muy conveniente para reducir los costos y el tiempo invertido para la elaboración de un proyecto o estudio (Comisión Nacional del Agua, 2005). El principal beneficio de la teledetección por satélite para la evaluación de la calidad de las aguas continentales, es la producción de vistas sinópticas sin la necesidad de costosos muestreos in situ (Hadjimitsis *et al.*, 2010).



Sin embargo, la estimación de la profundidad y de la calidad del agua a través de imágenes de satélite tiene inconvenientes técnicos que han hecho que su uso no haya sido tan usual. Entre los principales inconvenientes está la dificultad de eliminar eficientemente el efecto de la atmósfera, el cual tiene un impacto significativo en los datos que registran los satélites, tal como la pérdida de información debido a la dispersión causada por los constituyentes atmosféricos y aerosoles, y a la baja relación señal/ruido de los sensores; no obstante, se han desarrollado metodologías para corregir las imágenes generadas por diferentes sensores (IOCCG, 2010; Roy *et al.*, 2014; Doña *et al.*, 2015).

Quizás una de las herramientas que más ha fortalecido el desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) ha sido la Percepción Remota, es decir, la técnica o conjunto de técnicas que permite medir y registrar la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la Tierra, y relacionar tales mediciones con su naturaleza y distribución. La Teledetección o Percepción Remota es una técnica que ha ido evolucionando aceleradamente durante las últimas década con el advenimiento de la tecnología satelital, sus orígenes se ubican con el inicio de las actividades aeronáuticas a principio de siglo XX para ir evolucionando con el desarrollo de las actividades espaciales. Hoy en día, las definiciones de teledetección se utilizan para describir las actividades que realizan los satélites, trasbordadores espaciales o determinado tipo de aviones. ([http://www.semar.gob.mx/s/informacion-sector/ciencia/ermexs/percepcion remota.html](http://www.semar.gob.mx/s/informacion-sector/ciencia/ermexs/percepcion%20remota.html). SECRETARIA DE MARINA).

2.3. Diversas funciones de los satélites

Los satélites también son diversos en función de factores como su resolución espacial, el número de regiones espectrales o bandas que registran, periodicidad con la que se obtienen las escenas, entre otros.

Algunos de los más conocidos son los sensores AVHRR (advanced very high resolution radiometer) con imágenes que pueden abarcar un país diariamente y el MODIS (moderate resolution imaging spectrometer), ideales para el monitoreo en gran escala de la biosfera; la serie Landsat y SPOT, adecuados para trabajos a nivel de mayor detalle, su área de cobertura es de aproximadamente 170x170 km y 60x60 km respectivamente. La resolución de un sensor es su habilidad para registrar información en detalle de las distintas cubiertas. La resolución depende de la capacidad de los sensores para distinguir variaciones de la energía electromagnética, del detalle espacial que captura y del número y ancho de las bandas que alberga.



De la misma data una historia que comenzó hace unos 600 millones de años, cuando alguna forma inferior de la vida animal diferencio algunas de sus células, volviéndolas fotosensibles.

También durante millones de años dicho rudimento fotosensible evoluciono convirtiéndose en un poderoso y sofisticado sensor, el ojo humano. Este tuvo un imitador mecánico, la cámara fotográfica, que hizo su aparición hace algo más de un siglo y que fue muy mejorada durante la década de 1930 para ser aplicada a la fotografía aérea. La segunda guerra mundial dio un gran impulso a la fotografía aérea así como a otras formas de percepción remota. Sin embargo el “salto cuántico” en esta disciplina se produjo en la década de 1960 cuando las plataformas satelitales reemplazaron a las aéreas y los sensores electrónicos multiespectrales, acoplados a computadoras, reemplazaron las cámaras fotográficas (Comisión nacional del agua, 2005).

Para el caso específico de la percepción remota, su historia debe contemplar dos momentos, a saber: el primero relacionado con el origen de las plataformas y el segundo con el origen de los sensores remotos. Los dos elementos son fundamentales pues dan razón a la existencia de esta ciencia. A través de la historia, la percepción remota su definición y forma de trabajo ha ido evolucionando, debido a las necesidades de hallar respuesta al conocimiento de la tierra y los fenómenos que en ella se presentan (<http://geoservice.igac.gov.co/>).

La percepción remota tiene mucho auge en la actualidad tratándose del tema ambiental, existen diversas aplicaciones, como la detección de peces en zonas de pesquería según la FAO, Determinación de Humedales, Impacto de la actividad humana en cuerpos de aguas superficiales, con todas estas se busca generar mejores posibilidades de tener un ambiente monitoreado y llevar a cabo el control del mismo.

2.4. Satélite LANDSAT

La constelación de satélites LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satellites), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 satélites de los cuales sólo se encuentran activos el 5 y el 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).



Los satélites LANDSAT llevan a bordo diferentes instrumentos. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor y por último, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros. Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120m.

2.5. Estado del Arte

Para el análisis multiespectral, muchos satélites cuentan con la suficiente resolución para ser utilizados en estudios de monitoreo de calidad del agua. Por ejemplo, Ekstrand (1992) estimó el contenido de clorofila *a* en aguas costeras utilizando datos del satélite Landsat; Lavery y Pattiaratchi (1993) desarrollaron modelos de regresión para predecir parámetros de calidad de agua superficial a partir de datos Thematic Mapper (TM), y demostraron que el satélite Landsat TM tienen el potencial, en términos de resolución y precisión, para ser utilizado como una herramienta útil en el monitoreo de la calidad de aguas estuarinas; Chen *et al.* (2003) investigaron la relación entre la concentración de clorofila y parámetros espectrales del sensor SPOT; mientras que He *et al.*, (2008) realizaron un monitoreo de calidad del agua, en un cuerpo de agua continental ligeramente contaminado.

En el estudio se establecieron y analizaron métodos de percepción remota para estimar la calidad de agua de parámetros tales como el contenido de algas, turbidez y demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT), nitrógeno amoniacal (NH₃-N), nitrógeno del nitratos (NO₃-N), fósforo total (PT), y fósforo disuelto (PO₄-P), a través de imágenes Landsat TM 5 (Zilioli *et al.*, 1994; Schneider y Mauser, 1996; Zhang. 2002).

Conociendo la necesidad de controlar la contaminación en las fuentes de aguas superficiales, garantizando la protección de la salud pública, los Ingenieros Sanitarios fueron probablemente los



primeros en examinar cuantitativamente la respuesta de una corriente a los procesos físicos, químicos y biológicos provocados por las descargas de residuos en ésta (Orlob, 1983).

En los años recientes se ha recurrido a la interconexión de diversas herramientas informáticas (SIG, modelos, bases de datos, etc.) para abordar de manera integral las prácticas de evaluación ambiental, en donde se hace necesario analizar el ambiente desde un enfoque global para apoyar la implementación de medidas de control y remediación. Los Sistemas de Información Ambiental, la Informática Ambiental o Enviromatics por su contracción en inglés, es un campo relativamente nuevo con bases en la computación y las ciencias ambientales y sociales. Involucra el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), modelación ambiental, indicadores ambientales, bases de datos, etc., aplicados a ecosistemas locales, regionales, nacionales o internacionales (Schimak, 2005).

En la actualidad, están surgiendo numerosos campos de aplicación para estas tecnologías como pueden ser:

- Inspección y análisis de color, dado la mayor precisión conseguida frente a las mediciones tradicionales RGB.
- Espectrografía analítica, aplicando la separación de información en bandas al análisis de composiciones a través de sus bandas de absorción en diferentes longitudes de onda. Está siendo empleada en industria químicas, farmacéuticas, alimentarias, etc.
- Control de calidad e inspección. El poder adquirir y procesar imágenes en bandas aisladas permite expandir las posibilidades de inspección, desde detección de golpes o podredumbres en frutas a ver el interior de envases opacos en el espectro visible o supervisar el proceso de fabricación de circuitos electrónicos.
- Teledetección para aplicaciones geológicas, análisis de aguas, explotaciones mineras, control forestal o de cultivos, etc.
- Aplicaciones médicas para monitorización y detección de enfermedades, etc. (<http://www.gradient.org/es/actualidad/noticias/196-vision-multiespectral.html>).



3. LANDSAT 8

El Landsat 8 lanzado el 11 de febrero de 2013, desde la Base Aérea de Vandenberg, California, en un cohete Atlas-V 401, con el carenado de carga útil extendida (EPF) de United Launch Alliance, LLC. La carga útil del satélite Landsat 8 se compone de dos instrumentos científicos y operacionales de la Tierra Imager (OLI) y el sensor de infrarrojo térmico (TIRS). Estos dos sensores proporcionan cobertura estacional de la superficie terrestre mundial a una resolución espacial de 30 metros (visible, NIR, SWIR); 100 metros (térmico); y 15 metros (pancromática).

El Landsat 8 fue desarrollado como una colaboración entre la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). La NASA llevó al diseño, construcción, lanzamiento y fases de calibración en órbita, tiempo durante el cual el satélite fue llamado el Landsat Data Continuity Mission (LDCM). El 30 de mayo de 2013, el USGS asumió las operaciones de rutina y se convirtió en el satélite Landsat 8. USGS conduce después de la puesta en marcha de las actividades de calibración, operaciones de satélites, la generación de productos de datos, archivado de datos y en la observación de los Recursos Terrestres y centro de la Ciencia (EROS).

3.1. Los avances evolutivos

Los instrumentos de Landsat 8 representan un avance evolutivo en la tecnología. OLI mejora sobre los últimos sensores Landsat utilizando una técnica demostrada por una sonda de la NASA en EO-1 satélite experimental. OLI es un sensor de la barredora de empuje con un telescopio con espejo de 4 y 12 bits de cuantificación. OLI recopila datos para su visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta bandas espectrales, así como una banda pancromática. Tiene una vida útil de cinco años. El siguiente gráfico compara la OLI bandas espectrales para Landsat ETM bandas 7's. OLI proporciona dos nuevas bandas espectrales, uno adaptado especialmente para detectar nubes cirros y la otra para las observaciones de las zonas costeras.

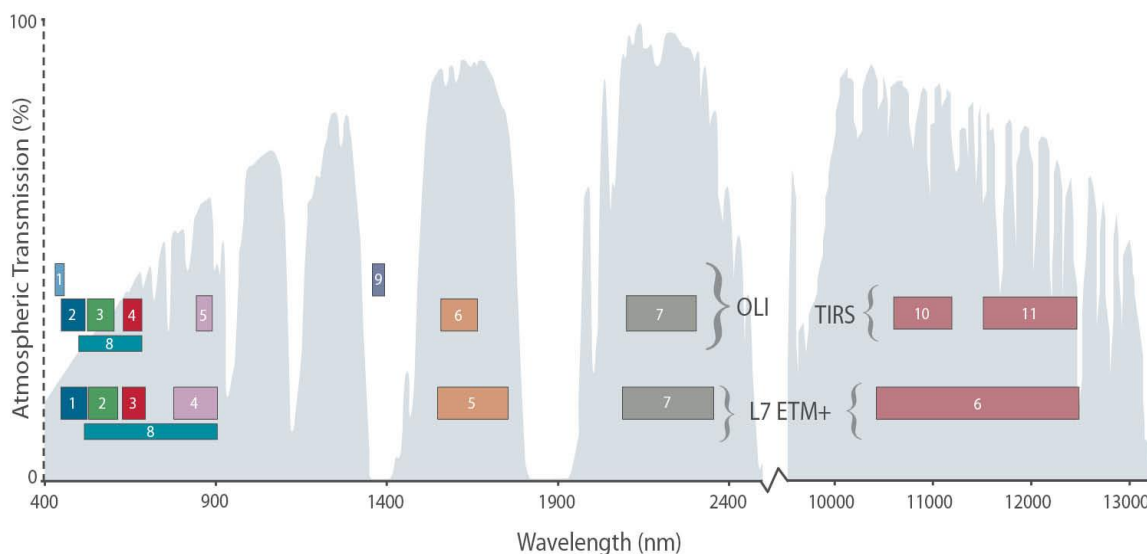


Figura 2. El OLI recopila datos para dos nuevas bandas, una franja costera (banda 1) y un cirrus BAND (banda 9), así como la herencia de bandas multiespectrales Landsat. Además, el ancho de banda ha sido refinado por seis de las herencia de bandas. El instrumento térmico (TIRS) lleva dos bandas en el infrarrojo térmico adicional. Nota: los valores de transmisión atmosférica para este gráfico se calcularon utilizando MODTRAN para un verano de latitud media turbia atmósfera (circa 5 km la visibilidad). **Gráfico creado por L.Rocchio.**



Tabla 4. Comparación Landsat 7 y Landsat 8.

Landsat-7 ETM+ Bands (μm)			Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm)		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 – 0.451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0.441 – 0.514	30 m Blue	0.452 – 0.512	Band 2
Band 2	30 m Green	0.519 – 0.601	30 m Green	0.533 – 0.590	Band 3
Band 3	30 m Red	0.441 – 0.514	30 m Red	0.636 – 0.673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0.772 – 0.898	30 m NIR	0.851 – 0.879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1.547 – 1.749	30 m SWIR-1	1.566 – 1.651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10.31 – 12.36	100 m TIR -1	10.60 – 11.19	Band 10
			100 m TIR -2	11.50 – 12.51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2.064 – 2.345	30 m SWIR-2	2.107 – 2.294	Band 7
Band 8	15 m Pan	0.515 – 0.896	15 m Pan	0.503 – 0.676	Band 8
			30 m Cirrus	1.363 – 1.384	Band 9

Fuente: B. Markham (July 2013).

TIRS recoge datos de dos bandas espectrales más estrechas en la región térmica anteriormente cubierto por una banda espectral más ancha en Landsats 4-7. Los datos de 100 m TIRS serán almacenados en los datos OLI para crear de forma radiométrica, geométrica, y productos de datos de 12 bits con corrección de terreno.

Landsat 8 ha ido adquiriendo regularmente 550 escenas por día (y Landsat 7 adquiere 438 escenas por día). Esto aumenta la probabilidad de capturar escenas sin nubes de la masa continental mundial.

3.2. Bandas del LANDSAT 8

Landsat 8 mide diferentes gamas de frecuencias a lo largo del espectro electromagnético - un color, aunque no es necesariamente un color visible para el ojo humano. Cada gama se llama banda, y Landsat 8 tiene 11 bandas.

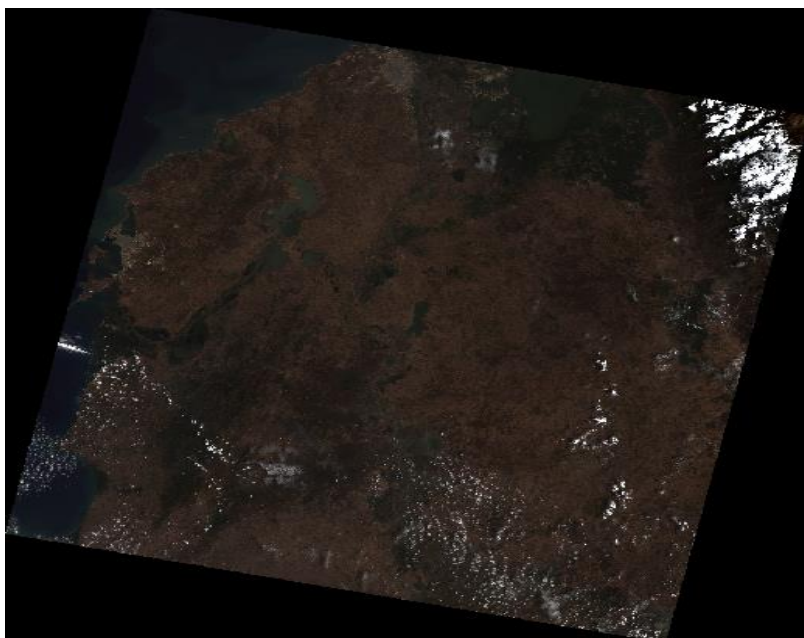


Figura 3. Vista de la zona del Embalse del Guájaro de Landsat 8, 16 de marzo de 2015.
(Fuente. Suministrada por la USGS).

En la Tabla 5 se encuentra la lista completa de las imágenes Landsat 8's, bandas:



Tabla 5. Lista de Bandas del Landsat 8 (Resolución Espectral y Espacial).

NUMERO BANDA	MICRAS	RESOLUCIÓN
1	0.433 a 0.453	30m
2	0.450 – 0.515	30m
3	0.525 – 0.600	30m
4	0.630 – 0.680	30m
5	0.845 a 0.885	30m
6	1.560 – 1.660	30m
7	2.100 – 2.300	30m
8	0.500 a 0.680	15m
9	1.360 – 1.390	30m
10	10.06 a 11.02	100m
11	11.5 – 12.5	100m

Fuente:http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php

De sus 11 bandas, solo las longitudes de onda muy corta (bandas 1-4 y 8) tienen Sentido de la luz visible - todos los demás están en partes del espectro que no podemos ver. La vista de color verdadero del Landsat es menos de la mitad de lo que ve. <http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3186>

3.2.1. Las bandas

- **Banda 1** sentidos azules y violetas. La luz azul es difícil de recolectar desde el espacio porque se dispersa fácilmente por pequeños pedacitos de polvo en el aire y el agua, e incluso por las moléculas de aire. Esta es la razón por la cual las cosas muy distantes (como las montañas en el horizonte) aparecen azuladas, y por qué el cielo es azul. Como podemos ver un montón de azul brumoso cuando miramos hacia arriba en el espacio en un día soleado, Landsat 8 ve el cielo por debajo de ella cuando se mira hacia abajo a nosotros por el mismo aire. Esa parte del espectro es difícil de recoger con sensibilidad suficiente para ser útil, y la banda 1 es el único instrumento de su tipo produciendo datos abiertos en esta resolución -una de las muchas cosas que hacen que este satélite especial. Es también llamado el costero/banda de aerosol, después

de sus dos usos principales: Imágenes de agua superficial, y el seguimiento de las partículas finas, como el polvo y el humo. Por sí mismo, su salida se parece mucho a la banda 2 (azul)'s normales, pero si queremos contrastarlas y resaltar las áreas con más azul profundo.



Figura 4. Sección del Embalse del Guájaro, Banda 1 Para esta Escena. **(Fuente.** Suministrada por la USGS).

- **Las bandas 2, 3 y 4** son visibles azul, verde y rojo. Observamos en la Imagen 3 una sección del Embalse del Guájaro , con un rango de diferentes usos de la tierra.

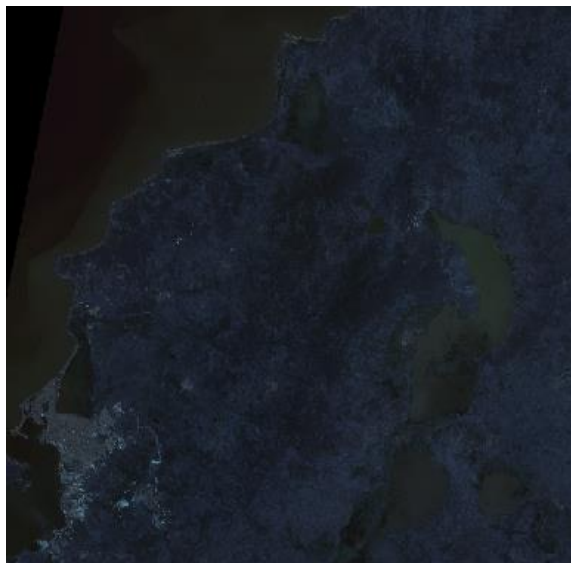


Figura 5. Sección del Embalse del Guájaro, Banda 2, 3 y 4 Para esta Escena. **(Fuente.** Suministrada por la USGS).

- **Banda 5** medidas en el infrarrojo cercano, o NIR. Esta parte del espectro es especialmente importante para la ecología, porque las plantas sanas se reflejan - el agua en sus hojas se dispersa en las longitudes de onda hacia el cielo. Comparándolo con otras bandas, tenemos índices como el NDVI, que nos permiten medir la salud vegetal de forma más precisa que si sólo nos fijamos en el verdor visible.

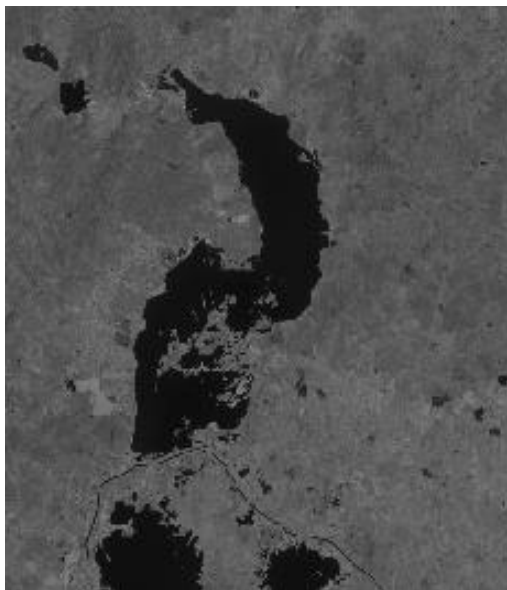


Figura 6. Sección del Embalse del Guájaro, Banda 5 Para esta Escena. **(Fuente.** Suministrada por la USGS).

- **Bandas 6 y 7** cubren distintos cortes de la onda corta, infrarrojos o SWIR. Son particularmente útiles para decidir la tierra húmeda de tierra seca, y de la geología: suelos y rocas que parecen similares en otras bandas a menudo tienen fuertes contrastes en SWIR. Vamos a hacer una imagen de color falso utilizando SWIR NIR como el rojo, el verde y el azul profundo como azul (técnicamente, un 7-5-1 la imagen):

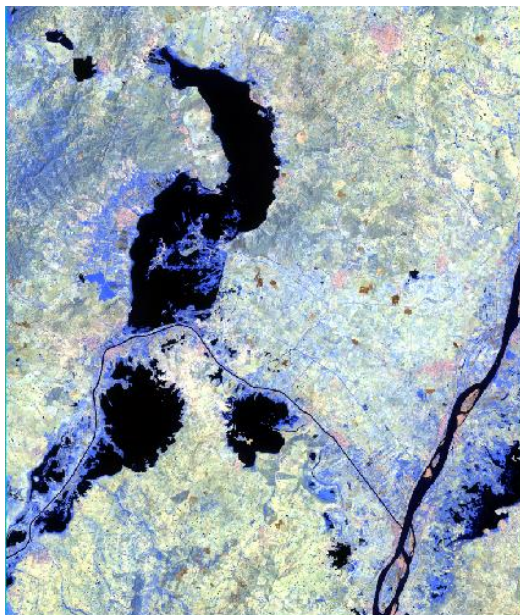


Figura 7. Sección del Embalse del Guájaro, Banda 6 y 7 Para esta Escena. **(Fuente.**
Suministrada por la USGS).

- **Banda 8** es la banda pancromática - o simplemente pan - banda. Funciona exactamente igual que las películas en blanco y negro: en lugar de recoger visible los colores por separado, se combina en un solo canal. Debido a que este sensor puede ver más luz a la vez, es la mayor de todas las bandas, con una resolución de 15 metros (50 pies).



Figura 8. Sección del Embalse del Guájaro, Banda 8 Para esta Escena. (Fuente. Suministrada por la USGS).

- **Banda 9** muestra la mínima, pero es una de las características más interesantes del Landsat 8. Cubre una rodaja muy fina de longitudes de onda: sólo 1370 ± 10 nanómetros. Pocos instrumentos basados en el espacio recogen esta parte del espectro, debido a que la atmósfera absorbe casi todo. El Landsat 8 se convierte en una ventaja. Precisamente porque el terreno es apenas visible en esta banda, algo que aparece claramente en ella deben reflexionar muy brillante y/o estar por encima de la mayoría de la atmósfera. Aquí la banda 9 para esta escena:

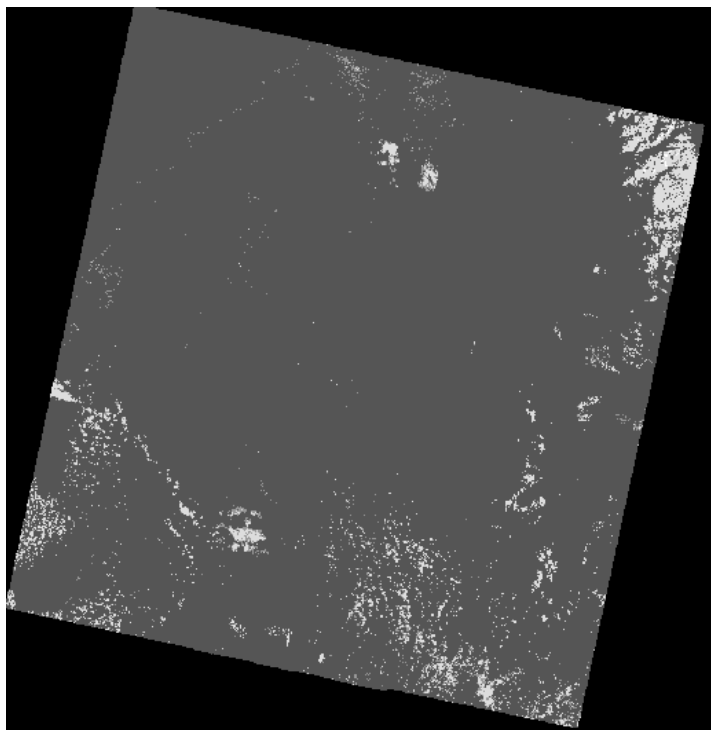


Figura 9. Se observa en la imagen suministrada por el Satélite Landsat 8, la Banda 9 recoge los cúmulos de nubes. **(Fuente.** Suministrada por la USGS).

Bandas 10 y 11 son las bandas en el infrarrojo térmico, o TIR - ven el calor. En lugar de medir la temperatura del aire, como estaciones meteorológicas, informan sobre el propio terreno, que es a menudo mucho más caliente. http://landsat.gsfc.nasa.gov/?page_id=5377



4. ENVI 5.2

4.1. Formulación y Descripción

El software ENVI ha sido desarrollado a partir del IDL (Interactive Data Language). Lo cual con este procesador se garantizarían múltiples funcionalidades debido a las inéditas innovaciones que nos presenta esta actual versión, la robustez, la velocidad y la sofisticación, sin la necesidad de un equipo de gran alcance. El libre acceso al lenguaje IDL permite personalizar el ENVI de acuerdo a sus necesidades con mayor aumento de la capacidad de análisis e interpretación de datos geoespaciales/SIG.

Una de las características más puntuales que posee el ENVI es La arquitectura abierta que permite obtener los mejores resultados con imágenes proporcionadas por los sensores de última generación, como IKONOS, QuickBird, Envisat, CARTOSAT-1, FORMOSAT-2, punto, GeoEye, WorldView I y II, entre otros. Además otras de las novedades más evidenciadas por ENVI es que eventualmente posee características únicas, tales como el análisis del espacio-temporal que aprovecha la información de la fecha/hora de la adquisición de las imágenes a través de la lectura del metadato en el momento en que se importa la imagen, permitiendo realizar análisis precisos relacionados a la variabilidad temporal de los datos., además de un conjunto completo de funciones para ortorectificación, elaboración de fichas de letras e imagen, análisis y visualización 3D del MDT, entre otros. IDL lenguaje en el que se basa ENVI, tiene los algoritmos más avanzados para el procesamiento espectral.

La combinación de herramientas de alto rendimiento, facilidad de uso y velocidad de procesamiento son las innovaciones con las cuales nos permite interactuar, ENVI y hacer una diferencia en la preferencia de los diferentes profesionales de esta solución en el sector de los GIS.

Por otra parte, la nueva versión del equipo fue desarrollado para extender las aplicaciones de imágenes y análisis de procesamiento secuencial de eficacia asociado con el manejo de vector de flujo, la fusión de imágenes, análisis de detección de cambio, entre otros.



4.2. Funcionalidades

4.2.1. Análisis de Imágenes para los modelos de SIG en su aplicación

La Información de imágenes geoespaciales, es por lo general sólo una parte de los datos necesarios para una representación completa de un área de interés. Ahora, con herramientas de ENVI para ArcGIS, los procesos de análisis de imagen se pueden integrar en modelos de SIG para añadir información a partir de imágenes de una variedad de aplicaciones.

La incorporación de la herramienta de extracción de características y clasificación en un modelo de planificación urbana puede proporcionar información precisa y robusta en superficies impermeables, por ejemplo. La adición de la herramienta de detección de cambios y el índice de vegetación a un modelo de gestión de recursos le puede dar información completa sobre los impactos ambientales producidos por los seres humanos o los cambios naturales.

La posibilidad de agregar los procesos de análisis de imágenes en modelos GIS reduce aún más la complejidad del análisis de la imagen y le da el poder de extracción de información geoespacial para los usuarios de SIG sin necesidad de conocimientos de teledetección.

4.2.2. Análisis de Imágenes

ENVI incluye un completo conjunto de herramientas de análisis de datos que permiten a los algoritmos de acceso basados en métodos probados científicamente de forma rápida, fácil y precisa. A través de estas herramientas se puede:

- Clasificación no supervisada y supervisada; basado en algoritmos avanzados;
- Crear estadística espacial como autocorrelación y semi-varianza;
- Calcular estadística de la imagen como promedio, min / max y la desviación estándar;
- Extracción de características;
- Sintetizar las imágenes de radar;
- Calcular componentes principales;
- Medición de funciones;
- Modelado de las características topográficas;
- Los filtros de aplicación;
- Realizar las bandas matemáticas y matemáticas espectral.



4.2.3. Análisis espectral

El análisis espectral permite utilizar la respuesta del píxel en diferentes longitudes de onda para obtener información sobre este material en cada píxel. ENVI es una empresa líder en el procesamiento de imágenes espectral, y con estas características es posible ejecutar:

- Clasificación no supervisada y no supervisada; basado en algoritmos avanzados;
- Identificación de las firmas espectrales usando; bibliotecas espectrales robustos;
- Detección e identificación de objetivos;
- Análisis y mapeo de material de interés;
- Utilizar un conjunto completo de herramientas de procesamiento posterior;
- Análisis de píxeles y subpíxeles;
- Cálculo de los bosques cordura con herramientas de análisis de la vegetación.

4.3. Aplicaciones

Agricultura: ENVI es un software que contiene el mayor número de herramientas para el análisis de imágenes hiperespectrales de proporcionar una fuente de información segura en el campo de la vigilancia agrícola, la calidad de la cosecha y el pronóstico de producción. También cuenta con las herramientas necesarias para el tratamiento de fotografías aéreas o imágenes de radar, particularmente útiles en la presencia de nubes.

- Se integra un gran número de formatos de imágenes aéreas, satélites, radares o térmica;
- Análisis del estado de las superficies y el reconocimiento de los cultivos;
- Superposición / Creación de "capas" de la producción de información, los cultivos o cualquier información en forma de vectores o ASCII;
- Cálculo instantáneo de los índices de vegetación;
- Herramientas de análisis espectral con el fin de evaluar un posible estrés de la cosecha;
- Creación rejilla de superficie (interpolación) a partir de datos adquiridos punto a punto;
- Estudio topográfico con el objetivo de canales, pozos de extracción, y otras propiedades de drenaje de tierras; etc.

La Cobertura Vegetal ENVI es el software ideal , fácil de manejar a pesar de tener herramientas sofisticadas para el procesamiento de datos de teledetección en la gestión del medio natural . ENVI



proporciona todas las herramientas necesarias para la extracción de información sobre la ocupación del suelo o de la morfología del terreno.

- Facilitar la lectura de los datos pancromáticas, multiespectrales, hiperespectrales, el radar, los modelos numéricos de terreno y SIG de datos vectoriales;
- La detección de enfermedades o plagas de insectos antes que el daño es visible;
- Mapas de especies de plantas a través de herramientas avanzadas espectrales;
- Caracterización Tierra MDT con el uso de herramientas topográficas;
- Análisis de la combinación de "raster - vector": campo de visión de las zonas "tampón", escaneo, edición de consulta, etc.

Recursos minerales: Es necesario para la interpretación geológica de la superficie, la detección de minerales específicos o manchas de petróleo, evaluar el impacto ambiental o derrame de petróleo. ENVI proporciona todas las herramientas necesarias para el tratamiento de las imágenes con el fin de extraer la máxima información de sus datos, ya sea en el contexto de sensores ópticos (pancromáticas - multiespectral- térmica) o de radar.

- Fácil acceso a imágenes de satélite, antena y el radar;
- Información sobre la altura de la Cruz, geofísica y SIG en sus imágenes;
- Mapa de cobertura terrestre para evaluar los impactos ambientales;
- Detección e identificación de minerales específicos a través de las herramientas de análisis espectral avanzada;
- Caracterización de la tierra (MST) a través de herramientas topográficas;
- Análisis de la combinación de "raster - vector": campo de visibilidad, zonas de amortiguamiento, escaneo, edición, consultoría, etc.

Medio Ambiente: Es necesario para vigilar las zonas de riesgo, la vegetación, los efectos del terreno caracterizan o detectar áreas de contaminación. Un gran número de profesionales e investigadores utilizan el software ENVI para optimizar sus proyectos ambientales. El desarrollo de los estudios sobre la superficie de la Tierra con el tratamiento de datos de teledetección a través de ENVI, se ahorrará tiempo y dinero.



- Mapa de localización y el estado de la cubierta vegetal;
- Evaluación de la calidad del aire y el agua;
- Análisis de la formación de dunas y el fenómeno de la eutrofización acuático;
- Control y medir el alcance de las manchas;
- Detección e identificación de materiales peligrosos;
- Exploración SAR (radar) para detectar derrames de petróleo y el tráfico marítimo;
- Análisis topográfico para evaluar los riesgos; etc.
<http://www.envi.com.br/index.php/envi/conheca>

5. METODOLOGÍA

Para lograr el cumplimiento puntual de los objetivos planteados anteriormente se realizaron las siguientes actividades que se describirán a continuación:

Inicialmente se consultaron fuentes disponibles en los principales centros de investigación del país para el otorgamiento de información primaria del área de estudio, estos centros fueron IDEAM, IGAC, CIOH, CRA, Cormagdalena, LEHLF, entre otros. Además de lo anterior se seleccionó y analizó objetivamente información climatológica, hidrológica, meteorológica y ambiental de la zona de estudio, incluyendo información de la cuenca hidrográfica asociada, así como del cuerpo de agua principal.

Partiendo de la anterior identificación y realización de consultas puntuales se realizaron dos campañas de medición y muestreo para la generación de información propia. Para los parámetros de calidad del agua se realizaron mediciones de campo (pH, Turbiedad, Profundidad, conductividad, oxígeno disuelto) en 17 sitios en toda la superficie del embalse con el fin de que los sitios de muestreo estuviesen distribuidos y extendidos sobre todo el espejo de agua del embalse, utilizando así una sonda multiparamétrica, en una ocasión se contrató a un laboratorio certificado para la toma de muestras.

Con el fin de proporcionar datos confiables que permitan evaluar la calidad del agua del Embalse El Guájaro, Atlántico, a partir de un análisis multi-espectral de imágenes satelitales.

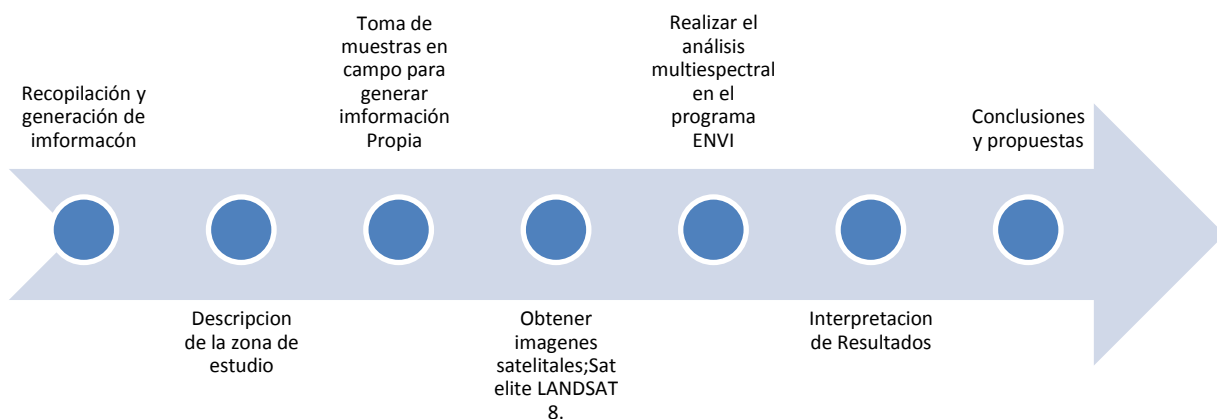


Figura 10. Actividades de Metodología (Fuente: Autores)



5.1. Descripción de la zona de estudio

El área de estudio es el Embalse del Guájaro (Figura 11), considerado una eco-región estratégica, ubicado a 10° 42' N y 75° 6' 0 al sur del Departamento del Atlántico. Sus áreas de influencia se encuentran en los municipios de Luruaco, Repelón, Manatí y Sabanalarga (CRA, 2007). El embalse El Guájaro tiene una extensión de 16,000 hectáreas, un volumen de 400 m³, abastece 12,000 ha por medio de un distrito de riego con un caudal aproximado de 230 Mm³, cuenta con dos sistemas de compuertas que la comunican con el canal del dique, permitiendo controlar los niveles del embalse (G.C, 2010). La cuenca del embalse se halla circunscrita entre las latitudes 10°46'51.19"-10°24'06.75" Norte y longitudes 75°15'11.20"-74°54'13.28" Oeste y posee un área de 90,039 Hectáreas (CRA, UniMagdalena, 2012).

En sus inicios, el embalse tenía capacidad para almacenar unos 400,000,000 m³ de agua, en un área total de 16,000 ha y con una profundidad promedio de cinco metros. Actualmente, El Guájaro tiene una extensión de 11,647 ha, un perímetro de 114.28 km y un volumen efectivo de 240,000,000 m³; el embalse cuenta con dos sistemas de compuertas que lo comunican con el canal del dique, permitiendo controlar los niveles (CRA-UNIMAGDALENA, 2012). La cuenca de El Guájaro se halla circunscrita entre las latitudes 10°46'51.19"-10°24'06.75" Norte y longitudes 75°15'11.20"-74°54'13.28" Oeste y posee un área de 90,039 ha . La región correspondiente a la zona de El Guájaro es fundamentalmente agrícola, se da en menor grado la ganadería y la explotación de canteras. La pesca representa un renglón importante de la economía, ocupando el tercer lugar entre los oficios identificados. Las tres principales ocupaciones de la población que labora son la agricultura 22.3%, comercio 22.1% y pesca 14.8%. En la zona media y norte de El Guájaro se ubican canteras, de las que se extrae principalmente material de construcción (arena, arcilla, caliza para cemento, grava y piedra), granjas camaroneras y distritos de riego. Las actividades económicas, a través de los vertimientos que realizan sobre el embalse de agua definen de una u otra forma, el comportamiento de los parámetros de calidad del agua (Torres-Bejarano *et al.*, 2015).

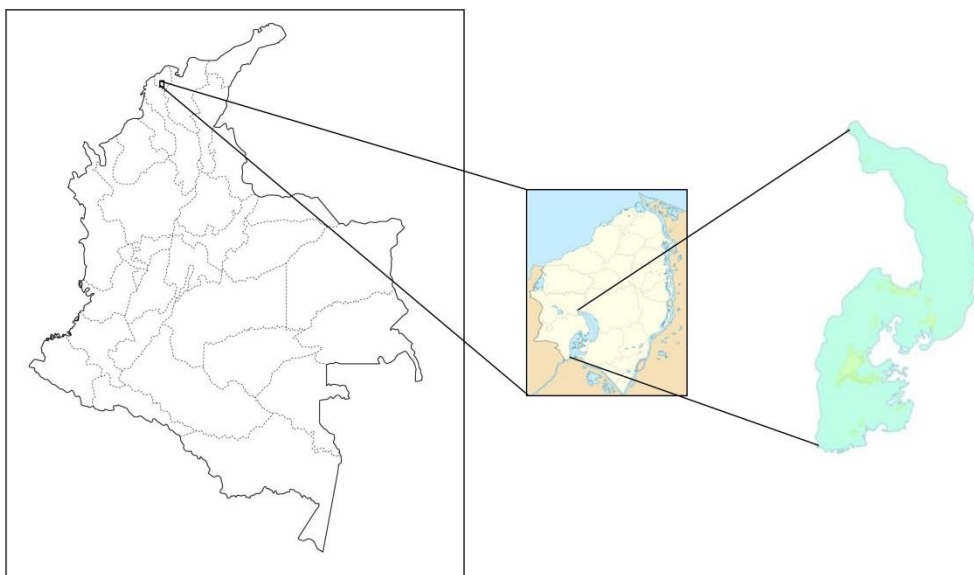


Figura 11. Localización del embalse El Guájaro. (Fuente: Los autores).

5.1.1. Actividades principales

Entre 1969 y 1970, se construyeron los distritos de riego que componen el Proyecto Atlántico 3 (UniNorte, 2009), con las siguientes características:

El Distrito de Repelón (W) del embalse, Comprende un área de 3.800 ha, de las cuales 3.400 son aprovechables.

El Distrito del Sur (E) del embalse, tiene un área de 37.000 ha; incluye los municipios de Santa Lucía, Manatí, Candelaria, Campo de La Cruz y Suán, de los cuales sólo el Distrito de Santa Lucía ha funcionado hasta la fecha con una captación de agua sobre el río Magdalena en el sitio San Pedrito, muy cerca de Calamar.

El Distrito de Riego de Molinero (N) del embalse del Guájaro, quedó incorporado como una posibilidad, para regar mediante bombeo, una extensión de cerca de 12.000 ha de tierras planas de buena calidad, pero no ha funcionado.

El panorama agrícola corresponde a una actividad ganadera, con una mayoría de pequeños ganaderos (menos de 5 Ha), rendimientos muy bajos y una utilización inadecuada de la tierra. El uso del suelo se basa en cultivos de yuca, maíz y plátano, principalmente. Complementariamente, y con orientación parcial hacia el pancoger, los agricultores siembran otras especies en las calles de algunos de estos



cultivos, como es el caso del guandul, la ahuyama y la patilla. Así mismo, se encuentra una porción importante de la superficie de la región, dedicada a la producción de pastos y algunos árboles forrajeros para el sostenimiento y explotación pecuaria, representada principalmente por los bovinos doble propósito. (ICA 2005).

Dentro del contexto agrícola es muy importante hablar de los suelos ya que los suelos del Atlántico han sido considerados como medianamente fértiles, con una gran limitante impuesta por las condiciones climáticas de una evapotranspiración excesiva. El Instituto Geográfico Agustín Codazzi declaró en el seminario sobre desertificación del Ministerio de Medio Ambiente y Naciones Unidas en 2003, que los suelos del Atlántico se encuentran en un grado de desertificación muy avanzado que llega a 90%, siendo el más alto del país. (IDEAM, 2003).

El informe del grupo AIGOS-Guájaro (2010), describe que en la actualidad la actividad rural más frecuente se da en la ganadería, orientada hacia la producción lechera y basada esencialmente en producciones muy pequeñas y sin tecnificación. En cuanto a la agricultura, se da esencialmente con la siembra de sorgo, plátano, maíz, frutales y palma de aceite.

La región correspondiente a la zona del Guájaro es fundamentalmente agrícola, se da en menor grado la ganadería y la explotación de canteras. La pesca representa un renglón importante de la economía de las poblaciones estudiadas, ocupando el tercer lugar entre los oficios identificados.

Las tres principales ocupaciones de la población que labora son las siguientes:

Agricultura	22.3%
Comercio	22.1%
Pesca	14.8%

La ganadería representa el 8.4% de las actividades agrícolas desarrollados en el área de influencia de la Ciénaga del Guájaro. Esta actividad productiva la podríamos calificar de selectiva, está concentrada en un sector de la población de clase alta y media alta. El mayor número de personas dedicadas a esta labor la encontramos en el municipio de Sabanalarga (PMA Guájaro, 2007).

5.2. Campañas de medición y colecta de datos

Se ejecutaron parcialmente dos campañas de muestreo antes del inicio de la época de lluvias, durante los días 28 de febrero (muestreo I), 16 de marzo de 2015 (muestreo II). La selección de los sitios de muestreo se realizó considerando que estos estuviesen distribuidos y extendidos sobre todo el espejo de agua del embalse, excepto donde había vegetación acuática superficial. En campo se midió, CE, OD y pH del agua a través de un equipo multiparamétrico (marca YSI, modelo 6600); la turbiedad se evaluó con un turbidímetro portátil (marca HACH, modelo 2100Q) y la profundidad del agua con una ecosonda batimétrica GPSMAP (marca Garmin, modelo 441s). Las campañas se planearon para que la caracterización del agua coincidiera con el día en que el satélite Landsat 8 toma la imagen en esta zona. En la estimación de parámetros de calidad del agua, a través de imágenes de satélite, se recomienda que la caracterización in situ o la colecta de muestras se realice preferiblemente el mismo día de la adquisición de la imagen de satélite o con una diferencia de ± 1 día, con el fin de minimizar errores y obtener una mejor calibración de los algoritmos generados para estimar la calidad del agua.

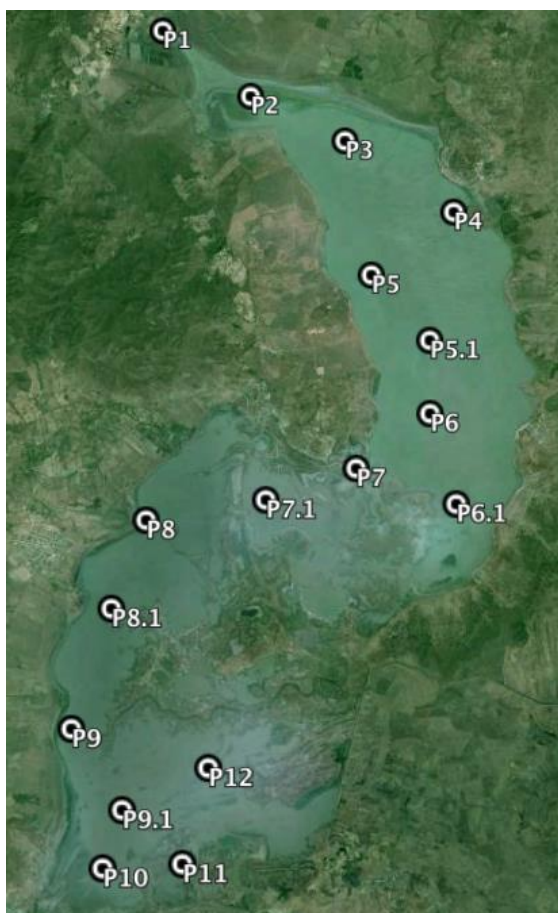


Figura 12. Sitios de Medición y Muestreo (Fuente: Google earth).



Tabla 6. Coordenadas de los puntos de muestreos.

Puntos muestreos	de	Coordenadas Geográficas	
		N	W
1		10.6193570	75.0968420
2		10.6029900	75.0750850
3		10.5919040	75.0519390
4		10.5743380	75.0254730
5		10.5589830	75.0454830
5.1		10.5432163	75.0314194
6		10.5256860	75.0216920
6.1		10.5042788	75.0252639
7		10.5126480	75.0491030
7.1		10.5052361	75.0706000
8		10.5004700	75.0990158
8.1		10.4798528	75.1069056
9		10.4521980	75.1157480
9.1		10.4337694	75.1035611
10		10.4206720	75.1078330
11		10.4216520	75.0893420
12		10.4433050	75.0835850

Fuente: Autores.

5.3. Resultados de la Calidad del Agua

Los resultados recolectados de la calidad del agua del embalse, fueron interpolados con el programa Surfer ® versión 11.0 y en las proyección UTM, Datum WGS 1984 18N. La metodología para la interpolación utilizada para los valores de calidad de agua, fue la de Kriging a un metro, ya que permite conocer la incertidumbre de los valores intermedios o equidistantes entre los puntos reportados.

5.3.1. Conductividad

Se muestra el comportamiento de la conductividad, parámetro que guarda estrecha relación con la salinidad y esta a su vez, con la cantidad de sólidos disueltos (iones) provenientes del contacto de minerales del suelo con el agua.

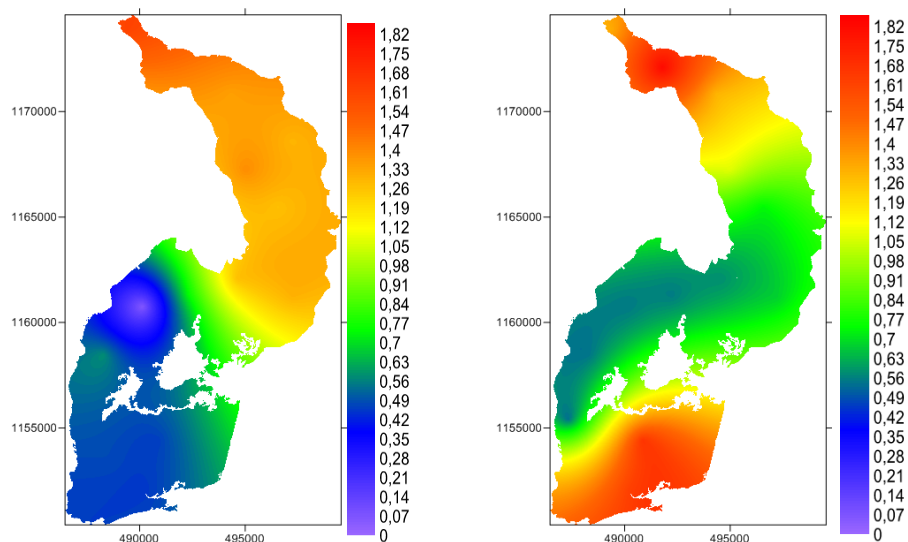


Figura 13. Mediciones *in situ* de Conductividad Eléctrica (Izq. 28/02/2015; Der. 16/03/2015)

5.3.2. Oxígeno Disuelto

Según Lampert y Sommer (2007), El suministro de oxígeno en el agua proviene de intercambio con la atmósfera o de la fotosíntesis de las plantas verdes y cianobacterias (algas azul-verde). Además, si su concentración es muy baja contribuye a que los organismos sean más susceptibles al envenenamiento con metales pesados y plaguicidas (Gaunt y Barker 2000).

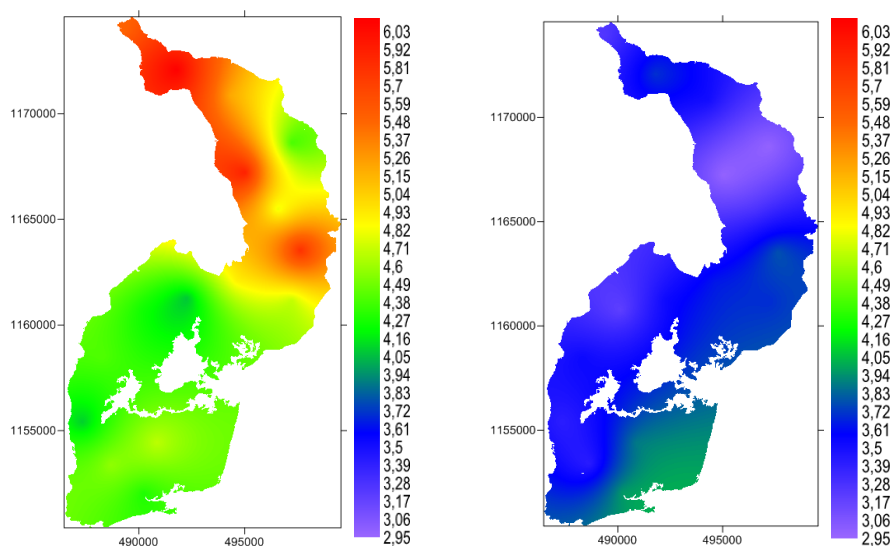


Figura 14. Mediciones *in situ* de Oxígeno Disuelto (Izq. 28/02/2015; Der. 16/03/2015)

5.3.3. pH

De acuerdo con Lampert y Sommer (2007), en un lago se pueden presentar tres procesos principales que pueden afectar el pH, la fotosíntesis, la respiración, y la asimilación de nitrógeno. Los efectos de la fotosíntesis y la respiración sobre el pH dependen en gran medida del equilibrio del dióxido de carbonato-bicarbonato de carbono.

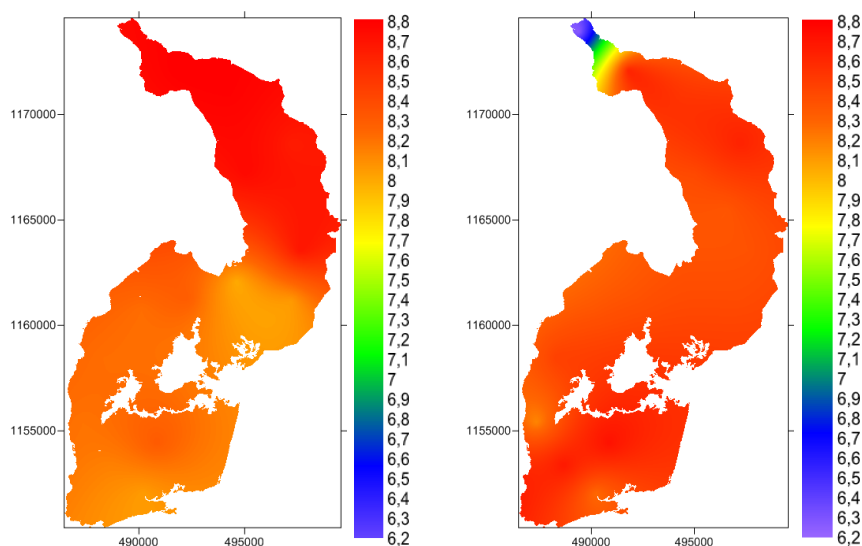


Figura 15. Mediciones *in situ* de pH (Izq. 28/02/2015; Der. 16/03/2015)

5.3.4. Turbiedad

La turbidez la definen materias finamente divididos en suspensión, como materias orgánicas e inorgánicas, que pueden ser arcillas, cieno o plancton. Este tipo de materia disminuye la transparencia del agua, interrumpiendo la propagación y absorbiendo la luz.

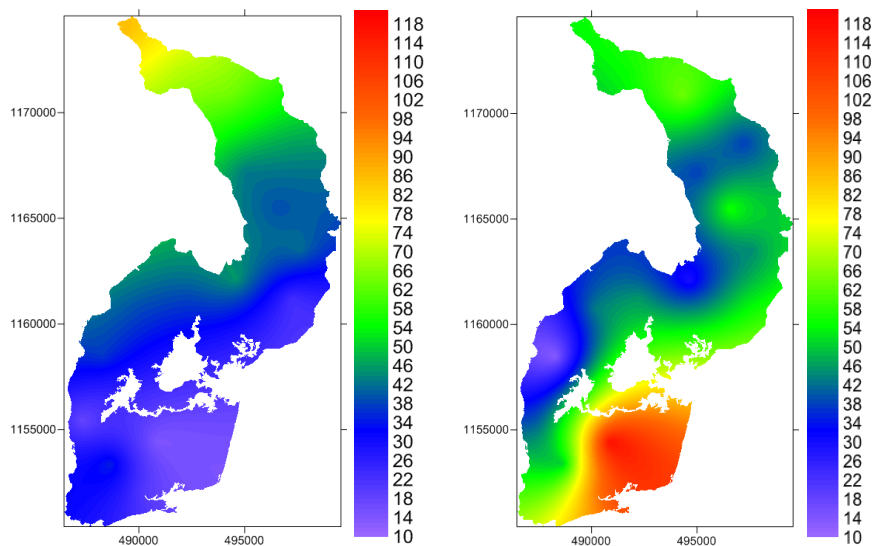


Figura 16. Mediciones *in situ* de Turbiedad (Izq. 28/02/2015; Der. 16/03/2015)

5.3.5. Profundidad

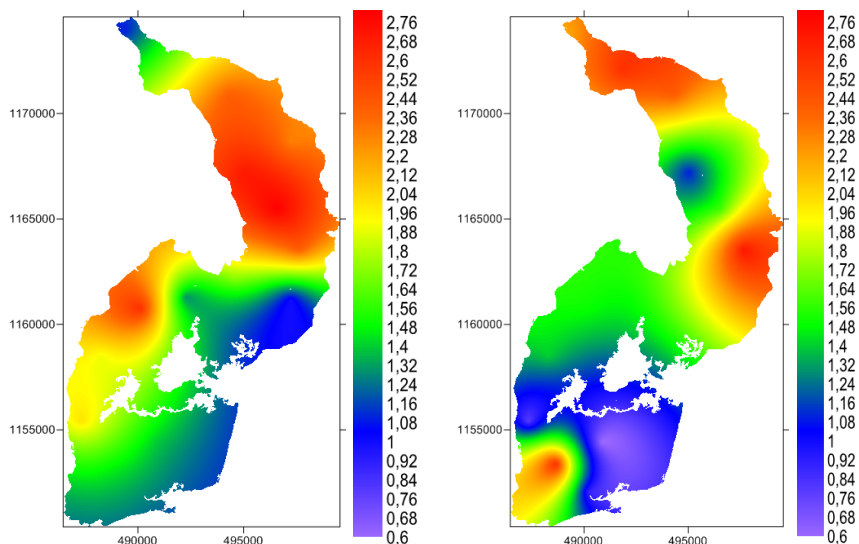


Figura 17. Mediciones *in situ* de Profundidad (Izq. 28/02/2015; Der. 16/03/2015)

5.4. Adquisición y procesamiento de las imágenes satelitales

Se utilizaron dos imágenes Landsat 8 (path, 9; row, 53), obtenidas el mismo día que se realizaron las mediciones *in situ* de calidad del agua en el embalse El Guájaro. Las imágenes fueron descargadas de la base de datos del US Geological Survey (USGS) a través del Global Visualization Viewer (<http://glovis.usgs.gov/>). La nubosidad en ambas imágenes analizadas, del 28 de febrero y del 16 de marzo, fue del 3%. Las imágenes de satélite fueron del tipo GeoTIFF de nivel 1. Landsat 8 es un satélite



cuyo objetivo es monitorear la superficie de la tierra, a través del registro de imágenes multiespectrales, para generar información que conlleve a cuidar el medio ambiente y la sostenibilidad del planeta; cuenta con dos sensores, el sensor multiespectral Operational Land Imager (OLI) y el sensor térmico infrarrojo Thermal Infrared Sensor (TIRS). A diferencia de los anteriores satélites Landsat (TM y ETM+), Landsat 8 tiene una resolución radiométrica más alta (12 bits), lo que hace que tenga una mejora significativa para detectar cambios en la superficie terrestre.

El procesamiento de las imágenes Landsat 8 consistió en realizar correcciones radiométricas y correcciones atmosféricas. La corrección radiométrica transforma los valores relativos de los píxeles, o números digitales, a mediciones absolutas de radiación por unidad de longitud de onda de la luz o a reflectancia. La corrección atmosférica elimina los efectos atmosféricos y de este modo transforma los valores radiométricos en radiación o reflectancia de superficie. Esto permite que mediciones de campo o parámetros biofísicos puedan ser estimados y comparados en el tiempo y el espacio. En este trabajo, la corrección atmosférica se aplicó a las bandas del espectro visible (azul, verde y rojo), a la banda NIR y a las bandas SWIR1 y SWIR2, a través del método de sustracción del objeto oscuro (Chavez, 1988). Método que asume que en la imagen algunos objetos oscuros tienen valores de reflectancia cercanos a cero; sin embargo, debido a la dispersión y absorción atmosférica, en los píxeles donde se ubican tales objetos se registran valores de reflectancia diferentes de cero. Estos valores deben de ser sustraídos de las diferentes bandas espectrales de la imagen. El software utilizado para procesar las imágenes fue Exelis Visual Information Solutions (ENVI, versión 5.2).

5.5. Delimitación de la superficie del agua

La superficie del agua del embalse El Guájaro se delimitó aplicando el índice diferencial de agua normalizado (NDWI, por sus iniciales en inglés), el cual es un índice utilizado para delimitar el agua del suelo en imágenes de satélite (Khattab, 2013). Los valores del NDWI están en el rango de -1 a 1, donde valores mayores que cero indican superficies cubiertas de agua y valores iguales o menores que cero refieren a superficies que no están cubiertas de agua.

$$NDWI = (b3 - NIR) / (b3 + NIR) \quad (1)$$

En la Ec. (1) b3 es la banda verde del espectro visible y NIR es la banda del infrarrojo cercano (b5).

La delimitación de la superficie del agua del embalse, a través del NDWI, se realizó en ENVI. Se generó una máscara en la que a los píxeles correspondientes a la superficie del agua se les asignó un valor de



uno y a los píxeles que no correspondían (suelo, vegetación, etc.) un valor de cero. La máscara generada se multiplicó por las imágenes de Landsat 8, previamente procesadas (con corrección radiométrica y atmosférica).

5.6. Análisis estadístico

Las diferencias entre los parámetros evaluados en el Muestreo I y el muestreo II fueron evaluadas estadísticamente por pruebas t-student ($p < 0.05$). Para la determinación de los modelos estadísticos se utilizaron los resultados de calidad del agua del muestreo II, como variables dependientes, y los datos de reflectancia de diferentes combinaciones de bandas espectrales de las imágenes Landsat 8 procesadas, como variables independientes. Previo a la determinación de los modelos se evaluó la normalidad de los datos a través de la prueba de Shapiro-Wilk, utilizando Real Statistics Resource Pack software (Zaionts, 2015). Cuando una serie de datos no presentó distribución normal, se procedió a normalizarla. Los modelos se generaron y validaron con la información generada en el muestreo II y muestreo I, respectivamente. Los modelos fueron generados a través de la técnica de regresión lineal de pasos sucesivos y la validación se realizó a través del análisis de regresión lineal simple, utilizando Matlab versión 2015.

5.7. Generación de mapas

Aplicando los modelos estadísticos a cada píxel del embalse, en las imágenes Landsat 8, se transformaron los valores de reflectancia a valores de CE, turbiedad, pH, OD y profundidad. Los mapas de la distribución espacial de los parámetros de calidad del agua y profundidad en el embalse El Guájaro se generaron con ArcMap 10.2.



6. RESULTADOS

6.1. Caracterización *in situ*

Los parámetros de calidad del agua y de la profundidad del embalse, evaluados en el muestreo I y muestreo II, se presentan en la Tabla 7. Con excepción del OD, los parámetros analizados no presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los dos muestreos. Los parámetros evaluados se compararon con los valores recomendados por la Legislación Colombiana en el Decreto de 1594, referente a las características de las aguas superficiales, subterráneas, marinas y estuarinas, incluidas las aguas servidas y la determinación para cada uso (MADR, 1984). La CE presentó valores promedio de 0.98 mS/cm en el muestreo I y de 1.06 mS/cm en el muestreo II, siendo la zona Norte del embalse la que presentó los mayores valores de CE (1.82 mS/cm). En ambos muestreos, en todos los sitios de muestreo, la turbiedad presentó valores mayores a los recomendados en el Decreto 1594, para agua de consumo humano y doméstico. El pH también presentó valores mayores a los recomendados para agua de consumo humano y doméstico, pero solo en los sitios ubicados en la parte norte del embalse; para preservación de flora y fauna, el pH estuvo dentro de los valores recomendados. Durante el muestreo I el OD presentó valores favorables para la preservación de flora y fauna, sin embargo, durante el muestreo II los valores fueron inferiores a los recomendados en el decreto, en todos los sitios analizados.

Tabla 7. Resultados de los parámetros medidos en campo.

Parámetros	Muestreo I (no.de sitios=17)			Muestreo II (no.de sitios=17)		
	<i>Min</i>	<i>Prom</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Prom</i>	<i>Max</i>
CE (mS/cm)	0.45	0.98	1.61	0.54	1.06	1.82
Turbiedad (NTU)	14.7 0	41.02	85.6 0	13.5 0	54.29	117.0 0
pH	8.00	8.41	8.81	8.18	8.51	8.80
OD (mg/L)	4.08	4.84	6.10	2.98	3.49	3.81
Profundidad (m)	1.00	1.85	2.80	0.60	1.76	2.70

Fuente: Los autores.



6.1.1. Modelos estadísticos de calidad de agua y profundidad

Los modelos estadísticos que fueron significativos ($p < 0.05$) y que mejor se ajustaron a los parámetros CE, turbiedad, pH, OD y profundidad, evaluados in situ en el muestreo II, así como los coeficientes de determinación (R^2) y el Error de la Raíz Cuadrada de la Media (ERCM) se presentan en la Tabla 8. El análisis de regresión mostró relaciones relativamente altas ($R^2 > 0.6419$) entre la reflectancia de las bandas espectrales de Landsat 8 y los parámetros de calidad del agua y profundidad, medidos en el embalse (Tabla 8). Los parámetros medidos in situ versus los estimados, se presentan en la Fig. 17.

La turbiedad del agua presentó un R^2 de 0.6419, relacionándose significativamente con la suma de las bandas b4 y b5. La turbiedad ocasiona que la luz se disperse y se absorba en vez de transmitirse en línea recta en la columna de agua. La turbiedad del agua puede ser originada por la presencia de materia suspendida y disuelta. Estudios previos indican que aguas turbias presentan alta reflectancia en las bandas b4 y b5 (Wu *et al.*, 2009), siendo acorde con lo encontrado en el presente estudio. La CE se vinculó con la relación b2-b3 entre b4-b6, presentando un R^2 de 0.6994. La variación de la CE en un cuerpo de agua se relaciona con cambios en la concentración de sólidos disueltos totales en el agua. El incremento en la salinidad del agua ocasiona cambios en la cantidad de radiación reflejada en las bandas del espectro visible e infrarrojo (Wu *et al.*, 2009), por lo que el incremento de la CE se relaciona directamente con el incremento de la reflectancia de la banda b6. Respecto al pH, se relacionó con las bandas b3, b4, b5 y b6 con R^2 de 0.8153. El pH es el logaritmo negativo de la concentración de iones H^+ y también se ha relacionado con la banda b6. El OD se relacionó con las bandas b1, b3, b4, b5 y b7, con R^2 de 0.930. El OD puede ser un indicador de la contaminación del agua causada por la descomposición de compuestos orgánicos, así como de productividad primaria. La profundidad del agua se relacionó con las bandas b1, b3 y b4, con un R^2 de 0.9217.

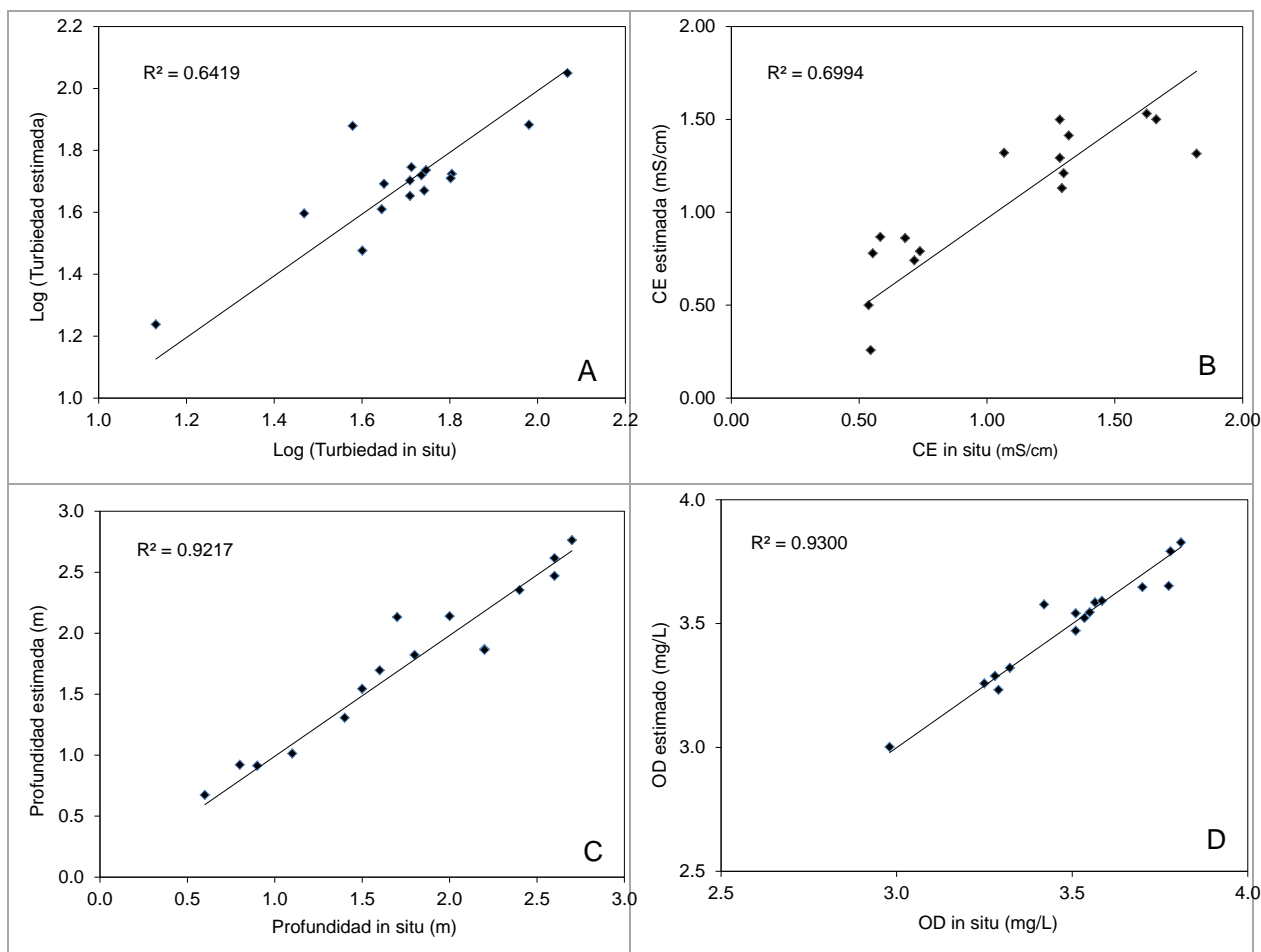
Tabla 8. Modelos estadísticos generados a partir de las imágenes Landsat, para estimar CE, turbiedad, pH, OD y profundidad en el embalse El Guájaro.

Parámetro	Ecuación	R^2	ERCM
CE	$CE = -6.6166 * \left(\frac{b2 - b3}{b4 - b6} \right) - 0.12025$	0.6994	0.223
Turbiedad	$\text{Log(Turbiedad)} = 10.26 * (b4 + b5) - 0.18359$	0.6419	0.111



pH	$pH = 11.987 + 422850000 * (B3)^{10} - 1263600000 * (B4)^{10} - 0.62664 * \left(\frac{1}{B5}\right) + 0.052596 * \left(\frac{1}{B6}\right) + 0.016603 * \left(\frac{1}{B5}\right)^2$	0.8153	0.088
Profundidad	$Profundidad = -0.54525 + 443420000 * (B1)^8 + 92125 * (B3)^5 - 186970 * (B4)^5 - 2088700000 * (B3)^{10}$	0.9217	0.213
OD	$OD = 37.182 + 223510000 * (B1)^8 + 72725 * (B3)^5 - 122280 * (B4)^5 - 3.5878 * \left(\frac{1}{B5}\right) - 1325.5 * (B7) + 85.887 * \left(\frac{B7}{B5}\right) - 1794000000 * (B3)^{10} + 0.086922 * \left(\frac{1}{B5}\right)^2$	0.930	0.0847

Fuente: autores.



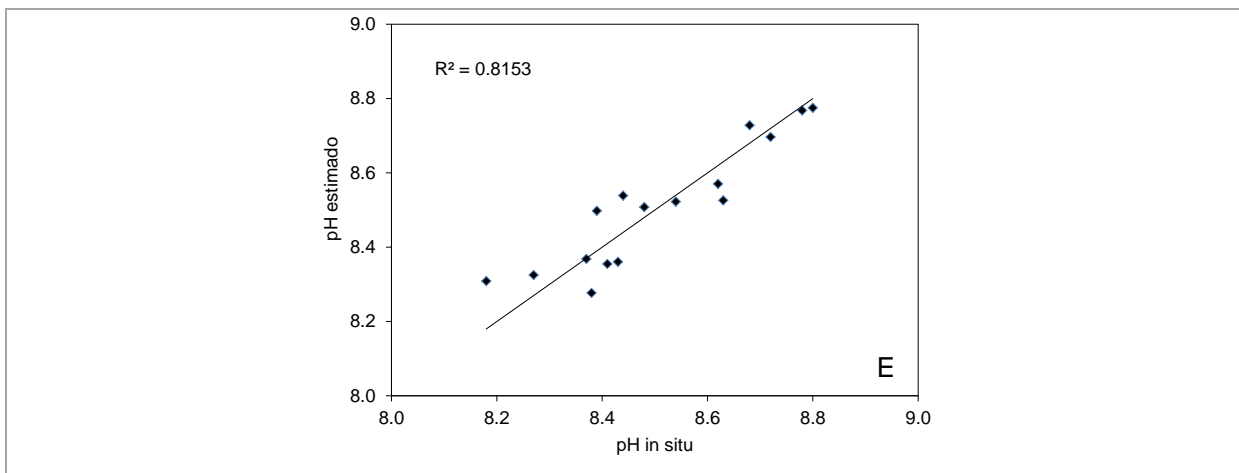


Figura 18. Mediciones in situ versus parámetros de calidad del agua y profundidad estimadas con modelos generados a partir de imágenes Landsat 8 del 16 de marzo de 2015.

La capacidad de los modelos estadísticos para predecir la variación espacial y temporal de CE, turbiedad, pH, OD y profundidad en el embalse, fue validada a través de análisis de regresión lineal simple, utilizando información espectral de la imagen del 28 de febrero de 2015 y los resultados de los parámetros de calidad del agua y profundidad obtenidos en el muestreo I. Solo los modelos de turbiedad, CE y profundidad pudieron ser validados (Fig. 18).

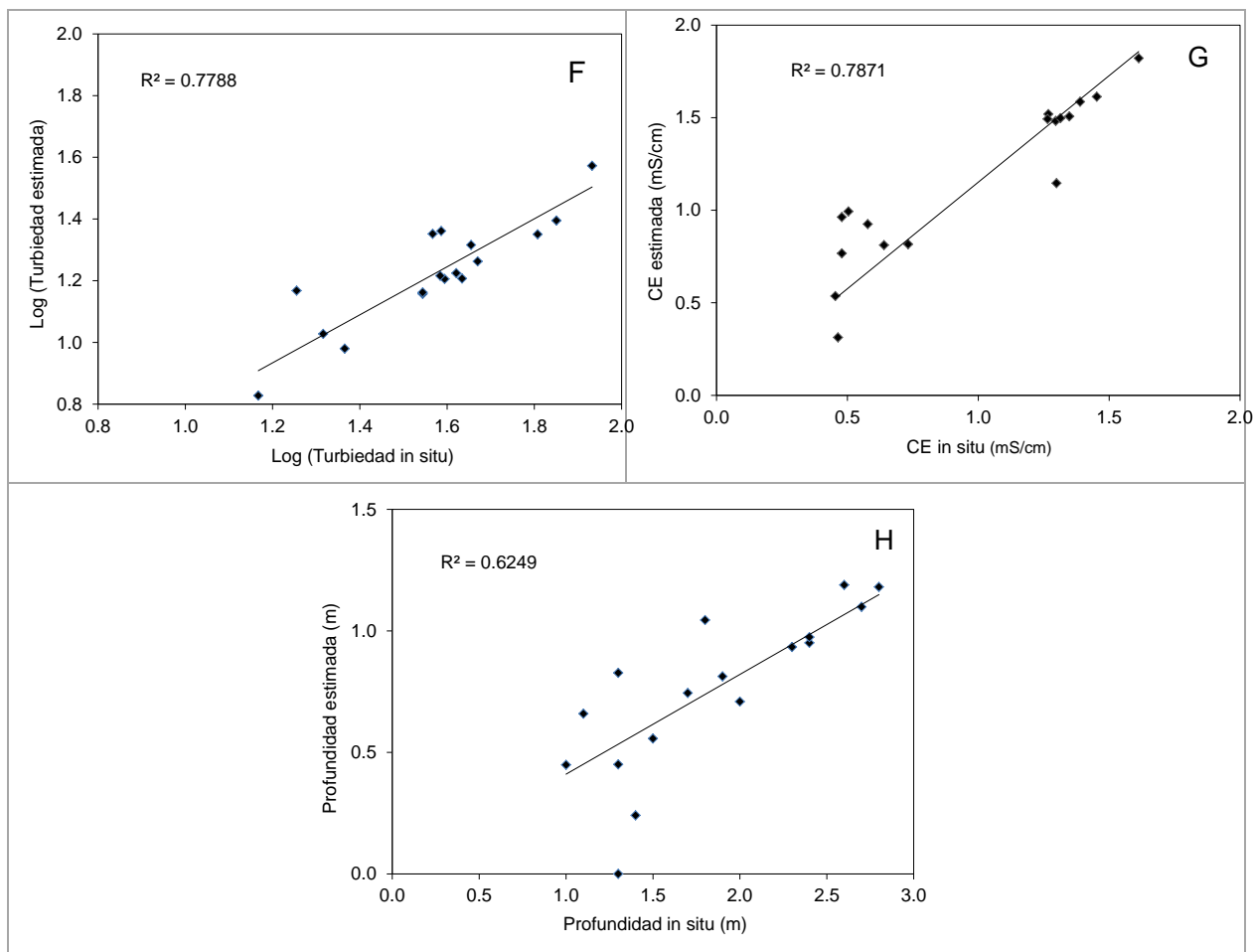


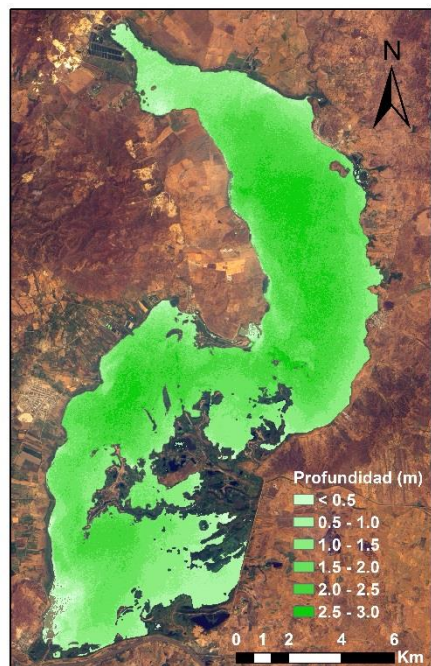
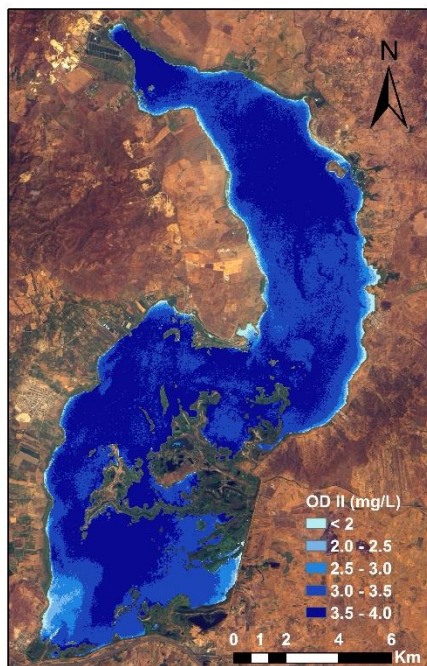
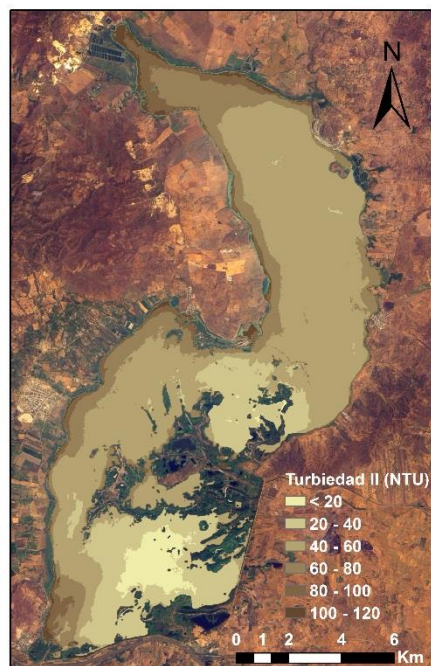
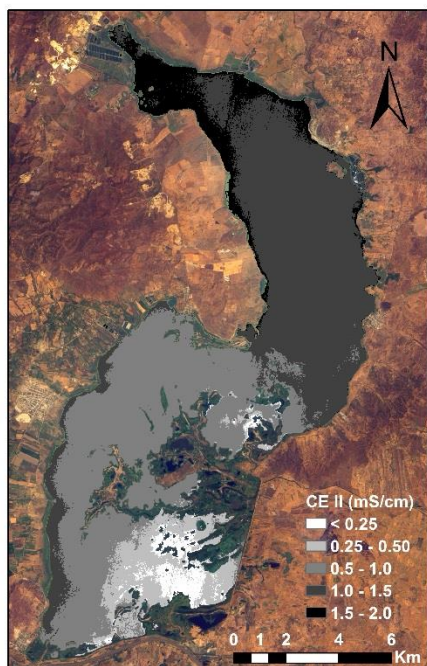
Figura 19. Resultados de la validación de los modelos, a través de análisis de regresión lineal simple, utilizando información espectral de la imagen del 28 de febrero de 2015 y resultados del muestreo I.

En la validación la CE presentó un R^2 de 0.7871, turbiedad un R^2 de 0.7788 y profundidad un R^2 de 0.6249. El modelo de CE predice relativamente bien la concentración, en el espacio y en el tiempo; sin embargo, en la validación de los modelos de turbiedad y profundidad se observa que se subestiman los valores de ambos parámetros (Fig. 18), por lo que no es conveniente utilizarlos para evaluar su variación temporal en el embalse.



6.1.2. Mapas de parámetros de calidad de agua y profundidad

A través de la aplicación de los modelos estadísticos a la imagen del 16 de marzo de 2015, se generaron los mapas de turbiedad, CE, pH, OD y profundidad en el embalse El Guájaro (Fig. 19). La CE presentó valores menores de 0.25 en la parte Sur y de 2 mS /cm en la zona Norte. La CE se distribuye casi uniformemente en dos grandes zonas del embalse; se observa un claro gradiente con tendencia al aumento de los valores de CE en dirección sur – norte, esto se debe a las características propias del suelo bajo el cuerpo de agua, ya que en zonas donde se presentan represamientos durante casi todo el año, se forman suelos de textura fina, salinos, como ocurría en la región norte del embalse, a diferencia de la zona sur que es donde se localizan las compuertas que alimentan al embalse con agua del Río Magdalena. Los valores más altos de turbiedad se presentaron en la zona norte del embalse, con valores que alcanzaron 117 NTU. Una de las principales actividades que se desarrollan en esta zona se relaciona con la explotación de canteras para la extracción de material de construcción, por lo cual existe un aporte importante de sedimentos, ya sea por escurrimiento superficial como por transporte aéreo, ocasionando un alto contenido de sedimentos en suspensión en esta zona del embalse y el consecuente aumento de la turbiedad. Los suelos aledaños al embalse El Guájaro, provenientes de areniscas y gravas bien drenadas son ligeramente ácidos a neutros. Sin embargo, en cuerpos de agua con fotosíntesis intensa se presentan valores de pH de casi 9, esto se observó en los resultados de las mediciones in situ y los estimados mediante el análisis multiespectral, valores que probablemente también son influenciados por las condiciones de óxido-reducción que predominan en el sistema debido a la degradación del material orgánico particulado, y la presencia de aguas más carbonatadas hacia el norte debido a la naturaleza del terreno. En general, los valores promedio de OD se encontraron por encima de 4 mg/L en todos los sectores del embalse para el Muestreo I; por el contrario, los valores observados durante el Muestreo II están ligeramente por debajo de los 4 mg/L, concentración mínima recomendable para la preservación de la vida acuática (MADR, 1984).



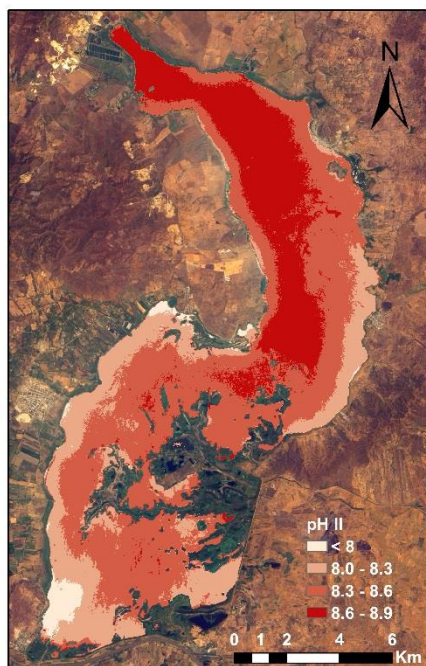


Figura 20. Variación espacial de CE, turbiedad, pH, OD y profundidad, estimados a través de los modelos estadísticos generados con la imagen Landsat 8 del 16 de marzo de 2015.



7. CONCLUSIONES

Modelos generados a partir de imágenes Landsat 8 pueden ser una herramienta muy útil para el monitoreo de parámetros de calidad y profundidad del agua en el embalse El Guájaro. La validación del modelo de CE, generado en esta investigación, indica que puede ser utilizado para evaluar la variación temporal de este parámetro, en temporadas con condiciones atmosféricas similares a las utilizadas para la generación de los modelos. La no validación de los modelos generados, para estimar la variación temporal de OD y pH, así como la sobre estimación de la profundidad y la turbiedad con los modelos generados, no limita su utilidad para evaluar la variación espacial a partir de un reducido número de parámetros evaluados *in situ*.

A través de los modelos generados se pudieron identificar patrones de distribución de los parámetros de calidad del agua y profundidad en el embalse, así como la posible relación de parámetros tales como CE y turbiedad con actividades antropogénicas que se desarrollan en el área de influencia de El Guájaro. Por lo tanto, los modelos generados a partir de imágenes Landsat 8, para estimar la variación espacial y temporal de calidad del agua en el embalse El Guájaro, es una herramienta que puede facilitar el manejo ambiental, económico y social del embalse.

Por medio de la implementación de imágenes satelitales se lograron proporcionar datos confiables que permitan evaluar la calidad del agua del Embalse El Guájaro,



REFERENCIAS

- B. Barba, L. 2002. Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del ambiente. Área académica de Ingeniería Sanitaria y ambiental. Santiago de Cali.
- C. CEPAL. 2002. La sostenibilidad del desarrollo en América Latina y el Caribe: desafíos y oportunidades. Santiago de Chile: CEPAL-Oficina Regional del PNUMA para América Latina y el Caribe. Chile. 164 pp.
- Chuvieco, E. 2008. Teledetección ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio. 3ª edición. Editorial Ariel, Barcelona, España.
- CRA-UNIMAGDALENA, "Actualización del manual de operaciones del hidrosistema al cual pertenece el embalse el Guájaro y llevar a cabo el diseño de las estructuras y sistemas para disminuir la vulnerabilidad de la zona ante eventos climatológicos extremos," 2012.
- CRA, ASOCAGUA (2007). Estudio de Evaluación del Impacto de la Actividad Camaronera Sobre la Capacidad de Carga del Embalse del Guájaro. Tomo III, pp 11-40.
- Creed, E., A. Pence y K. Rankin. 2001. Inter-comparison of turbidity and sediment concentration measurements from an ADCP, an OBS-3, and a LISST. Dept. Environ. Prot. New Jersey, pp. 27.
- E. Envi.com.br/index.php/envi/conheca
- Escobar, Jairo. 2002. La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. División de Recursos Naturales e Infraestructura. Santiago de Chile.
- Gaunt, P. & S. Barker. 2000. Matrix Solid Phase Dispersion Extraction of Triazines From Catfish Tissues; Examination of the Effects of Temperature and Dissolved Oxygen on the Toxicity of Atrazine. Int. J. Environ. Pollut. 13: 284-312.
- Geoservice.igac.gov.co/, TELECENTRO REGIONAL EN TECNOLOGIAS GEOESPACIALES.
- Gradient.org/es/actualidad/noticias/196-vision-multiespectral.html, CENTRO TECNOLÓGICO DE TELECOMUNICACIONES DE GALICIA).



- H. HE, W., Chen, S., Liu, X. y Chen, j. 2008. Water quality monitoring in a slightly-polluted inland water body through remote sensing — Case study of the Guanting Reservoir in Beijing, China. *Front. Environ. Sci. Engin. China*, 2(2): 163–171.
- Holdaway, P., D. Thorne, R. Flatt, E. Jones & A. Prandle. 1999. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Cont. Shelf Res.*, 19: 421-441.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, noviembre de 2003. Diagnóstico y Recomendaciones de Acción Para ser Incluidos en El Plan Nacional de Acción en la Lucha Contra la Desertificación y Manejo de Ecosistemas de Zonas Secas en Colombia (Pan), Fase I. Bogotá: Autores.
- J. Jiufa, L. & Z. Chen. 1998. Sediment resuspension and implications for turbidity maximum in the Changjiang Estuary. *Mar. Geol.*, 148: 117-124.
- Julio Martínez Muñoz, Comisión Nacional del Agua, CNA; Percepción Remota “Fundamentos de Teledetección Espacial”, 2005.
- K. Kondratyev K, Pozdnyakov D V. 1998. Water quality remote sensing in the visible spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5): 957–979.
- Lampert W. y Sommer U. (2007). *Limnoecology*. Ed. Oxford University Press Inc. New York, United states.
- L. Lavery, P. y Pattiaratchi, C. 1993. Water quality monitoring in estuarine waters using the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 46(33): 268–280.
- landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3186.
- landsat.gsfc.nasa.gov/?page_id=5377.
- Libreros, Juan F., Taborda, Alexander., Amortegui, Viviana., Arroyave, Andrea., Sandoval, Alejandro., Estrada, Edgar., Leal, Jenny., Vasquez, Jairo y Vivas, Alberto. 2013. Deforestación y sedimentación en los manglares del Golfo de Uraba. Síntesis de impactos sobre la fauna macrobéntica e íctica en el delta del Río Turbo. *Revista. Gestión y ambiente*. Vol. 16.num. 2. Agosto. Pp 19-36.
- M. Ministerio de medio ambiente (MMA), Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA) y Corporación Autónoma del Canal del Dique (CARDIQUE).



2000. Plan de manejo ambiental del complejo de ciénagas Totumo, Guájaro y El Jobo en la ecorregión estratégica del Canal del Dique. 243p.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (MIN. AMB), CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL ATLÁNTICO (CRA) Y LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA DEL CANAL DEL DIQUE (CARDIQUE). 2002. Manejo integral del complejo de Ciénagas el Totumo, Guájaro y el Jobo en la ecorregión estratégica del Canal del Dique. Barranquilla –Colombia.
 - MMA - Centro de Ecología Aplicada. 2011. Diseño del inventario nacional de humedales y el seguimiento ambiental. Ministerio de Medio Ambiente. Santiago.
 - P. Programa para las naciones unidas y el medio ambiente PNUMA. 2007. Perspectivas del medio ambiente mundial GEO 4 medio ambiente para el desarrollo.
 - R. Rebecca Beard, M.A., MODULO SOBRE TELEDECCION Y ANALISIS DE CAMBIO DE USOS Y COBERTURA DE LA TIERRA, 2008. Schneider K, Mauser W. 1996. Processing and accuracy of Landsat Thematic Mapper for lake surface temperature measurement. International Journal of Remote Sensing, 17(11): 2027–2041.
 - S. Secretaría de Marina, 2002, de www.semar.gob.mx.
 - www.semar.gob.mx/s/informacion-sector/ciencia/ermexs/percepcion_remota.html. SECRETARIA DE MARINA).
 - Seker D Z, Goksel C, Kabdasli S, Musaoglu N, Kaya S. 2003. Investigation of coastal morphological changes due to river basin characteristics by means of remote sensing and GIS techniques. Water Science and Technology, 48(10): 135–142.
 - U. USGS (U.S. Geological Survey). 2014. Earth Resources Observation and Science Center (EROS). Disponible en: <http://glovis.usgs.gov>.
 - W. Wang, X.J. y Ma, T. 2001. Application of Remote Sensing Techniques in Monitoring and Assessing the Water Quality of Taihu Lake. Bull. Environ. Contam. Toxicol, 67; 863–870.
 - Z. Zilioli E, Brivio P A, Gomasasca M A. 1994. A correlation between optical properties from satellite data and some indicators of eutrophication in Lake Garda (Italy). Science of the Total Environment. 158: 127–133.
-